

# ВІСНИК

ОДЕСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО  
МОРСЬКОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ

53

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



**ВІСНИК  
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

*Збірник наукових праць*

**ВИПУСК 4 (53)**

*Заснований у червні 1997 року*

**Одеса – 2017**

ОДЕСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК  
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

№ 4 (53)  
2017

Заснований у червні 1997 року

Виходить 4 рази на рік

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

УДК 629.12.002(082) Збірник включено до переліку наукових фахових видань України,  
в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт  
на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук  
(Наказ Міністерства освіти і науки України № 820 від 11.07.16)

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

Редакційна колегія:  
д-р техн. наук, проф. *С.В. Руденко* – відп. редактор  
канд. техн. наук, доц. *О.В. Демідюк* – заст. відп. редактора  
*Г.І. Силакова* – відповід. секретар

д-р фіз.-мат. наук, проф.	<i>Андронов І.Л.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Івановський В.Г.</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Вассерман О.А.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Іванченко О.О. (Росія)</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Гришин А.В.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Коростильов Л.І.</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Дубровський М.П.</i>	д-р економ. наук, проф.	<i>Лапкіна І.О.</i>
д-р техн. наук	<i>Дульнев О.І. (Росія)</i>	д-р економ. наук, проф.	<i>Махуренко Г.С.</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Єгоров Г.В.</i>	д-р економ. наук, проф.	<i>Постан М.Я.</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Єзупов К.В.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Яровенко В.О.</i>

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Одеського національного морського університету  
(протокол № 4 від 22 листопада 2017 р.)

Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв,  
назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей.

Висловлені у цих статтях думки можуть не збігатися  
з точкою зору редакційної колегії, не покладають на неї ніяких зобов'язань.  
Передруки і переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції.

## ГІДРОДИНАМІКА, ТЕОРІЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ КОРАБЛЯ

**Егоров Г.В., Егоров А.Г.**

Оценка риска эксплуатации сухогрузных судов  
типа «Волго-Дон» и «Волжский» ..... 5

**Егоров Г.В., Демидюк А.В., Тонюк В.И.**

Экспериментальное исследование заливаемости кранового судна  
с трюмом, не оснащенного люковыми закрытиями ..... 25

## ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВОГО ОБЛАДНАННЯ

**Егоров Г.В., Нильва А.Е., Колесник Д.В.**

Технические проблемы управления балластными водами  
на новых и существующих судах ..... 40

**Данилян А.Г., Чимшир В.И.**

Совершенствование защиты цилиндрических втулок и блоков  
цилиндров СДВС от кавитационного разрушения ..... 74

**Тузова І.А., Челабчі В.В., Челабчі В.М.**

Чисельне моделювання потоків в щілинних каналах ..... 85

**Панченко Т.Д., Стародуб В.І., Челабчі В.В., Челабчі В.М.**

Ідентифікація моделей динамічних об'єктів при згладжуванні  
часових рядів ..... 96

## БУДІВЕЛЬНА МЕХАНІКА, МІЦНІСТЬ СУДЕН ТА СПОРУД

**Литвиненко Д.Ю.**

Методики розв'язку задач втомної міцності суднокорпусних  
вузлів при нерегулярному навантаженні на базі  
експериментально-теоретичного методу ..... 110

**Лукаш Э.П., Партолога М.И.**

Расчетный анализ вибрации буксира Linz ..... 126

**Кобзарук А.В., Сабуров А.И., Смажило Б.В.**

Малоцикловая долговечность в морской воде корпусных сталей  
с различной стойкостью к коррозионному растрескиванию ..... 134

**Присташ С.Ф., Бурдун Є.Т.**

Метод розрахунку міцного корпусу підводного апарату  
в формі тору, виконаного намотуванням ..... 152

## ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО

**Блажко А.П.**

Еколого-іригаційне оцінювання якості поверхневих вод  
в басейні річки Алкалія Одеської області ..... 164



## ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

<b>Онищенко С.П., Дрожжин О.Л.</b> Концептуальна модель формування контейнеропотоків фідерної контейнерної судноплавної лінії .....	175
<b>Вишневская О.Д.</b> Модель распределения бюджета времени судов по долгосрочным фрахтовым контрактам в условиях интервальной неопределенности параметров транспортного процесса .....	184
<b>Щербина О.В.</b> Аналіз та синтез класифікаційних ознак у баржо-буксирній транспортно-технологічній системі .....	194
<b>Мурад'ян А.О., Русанова С.С.</b> Обгрунтування підходу до забезпечення узгодженого управління транспортними вузлами .....	200

## УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ

<b>Varvara Piterska</b> Mechanisms for the value management of innovative projects .....	214
<b>Григорян Т.Г., Титов С.Д., Чернова Л.С.</b> Балансування цінностей стейкхолдерів проекту на основі теоретико-ігрового підходу .....	222
<b>Леонтьева А.И.</b> Оценка ценности проектов технического развития предприятий .....	239

## ПРОБЛЕМИ ПІДГОТОВКИ СПЕЦІАЛІСТІВ

<b>Бреднёва В.П., Кошарская Л.В.</b> О дистанционных технологиях обучения в профессиональном образовании .....	251
--	-----

УДК 629.12

Г.В. Егоров, А.Г. Егоров

**ОЦЕНКА РИСКА ЭКСПЛУАТАЦИИ  
СУХОГРУЗНЫХ СУДОВ ТИПА «ВОЛГО-ДОН» И «ВОЛЖСКИЙ»**

*Выполнен анализ происшедших аварий с сухогрузными судами смешанного плавания проектов 507А, 507Б, 1565 (с модификациями) типа «Волго-Дон» и проекта 05074 (с модификациями) типа «Волжский». Всего было обработано 146 аварийных случаев. Выявлены основные опасности, приведшие как к авариям, так и к катастрофам. Наблюдается устойчивый рост аварийности для судов старше 15 лет с пиками аварий для судов возрастом 23-26 и 33-40 лет. Установлено, что главными опасностями являются водотечность непроницаемого корпуса, сознательное нарушение установленных ограничений по району и сезону плавания, а также «внепроектные» контакты (контакты со стенками шлюзов, причалов, посадки на мель, столкновения с другими судами и т.п.).*

**Ключевые слова:** суда внутреннего плавания, суда смешанного река-море плавания, анализ риска, опасности, ущерб, проектирование, надежность, прогноз.

*Виконаний аналіз аварій, які трапились із суховантажними судами змішаного плавання проектів 507А, 507Б, 1565 (з модифікаціями) типу «Волго-Дон» і проекту 05074 (з модифікаціями) типу «Волзький». Усього було оброблено 146 аварійних випадків. Виявлені основні небезпеки, які привели до аварій або катастроф. Спостерігається стійкий зріст аварійності для суден віком більше, ніж 15 років з піками аварій для суден віком 23-26 і 33-40 років. Встановлено, що головними небезпеками є водотічність непроникного корпусу, свідоме порушення встановлених обмежень за районом і сезоном плавання, а також «позапроектні» контакти (контакти зі стінками шлюзів, причалів, посадки на міліну, зіткнення з іншими суднами й т.п.).*

**Ключові слова:** судна внутрішнього плавання, судна змішаного ріка-море плавання, аналіз ризику, небезпеки, збиток, проектування, надійність, прогнозування.

*The analysis of failures with river-sea dry-cargo vessels of 507A, 507B, 1565 projects (with modifications) of «Volgo-Don» type and of 05074 project (with modifications) of «Volzhskiy» type is executed. 146 emergency cases of vessels were analyzed. Basic dangers, resulting both in failures and casualties, are exposed. Steady growth of breakdown is observed for vessels older than 15 years with peaks of accidents at 23-26 and 33-40 aged vessels.*

*It is established that the main danger is permeability of hull structures, conscious violation of set restrictions of sailing area and season of operation, and also «off-project» contacts (contacts with walls of locks and berths, groundings, collisions with other vessels, etc.).*

*Keywords: inland vessels, river-sea vessels, risk analysis, dangers, damage, design, reliability, prognosis.*

**Постановка проблемы.** Как уже не раз отмечали авторы, суда «Волго-Дон макс» класса являются наиболее востребованными на отечественном рынке [2; 7] и оценка риска их эксплуатации представляет большой интерес для судовладельцев, проектантов, надзорных органов и страховых компаний.

Первым в этом классе в 1960 году был построен (на Окской судовой верфи в Навашино) сухогрузный теплоход проекта 507 «Волго-Дон 1» габаритными размерами (длиной x шириной x высотой борта x осадкой) 138,3x16,70x5,50x3,5 м (по габаритам вновь построенного Волго-Донского судоходного канала) [1]. Судно проектировалось ЦКБ «Вымпел» (главный конструктор В.А. Евстифеев) для эксплуатации на реках и водохранилищах Центрального бассейна единой глубоководной системы внутренних водных путей СССР без ограничений по погоде на перевозках массовых грузов на класс «О» Речного Регистра РСФСР с ледовыми подкреплениями для плавания в битом льду. Технический проект был утвержден в 1958 году, головное судно вышло на ходовые в ноябре 1960 года.

В итоге, было получено от Окской судовой верфи и румынского завода Олтеница 227 самоходных судна типа «Волго-Дон» проектов 507, 507А, 507Б, 1565, 1566, 1565М, 1565А, 1565МА и их продолжения – 63 судна типа «Волжский» проектов 05074, 05074М, 05074А.

Кроме того, для реализации концепции составного судна построили 28 барж-приставок (несамоходных) типа «Волжский» проекта 05074.

На январь 2017 года в эксплуатации формально находилось 166 сухогрузных самоходных судна типа «Волго-Дон»/«Волжский». Из них 35 в негодном техническом состоянии. За прошедшие годы практически все суда были переклассифицированы (или сразу строились) из озерных в суда смешанного река-море плавания (М-СП – 10 судов, М-ПР – 18 судов, О-ПР – 68 судов, R3-RSN – 15 судов, R2-RSN – 41 судно). Всего в речном классе осталось 96 судов этого типа в исходном сухогрузом варианте.

В целом, суда типа «Волго-Дон»/«Волжский» были и есть «рабочими лошадками» отечественного водного транспорта, успешно обеспечивая перевозку значительной части навалочных грузов, в том числе экспортных, на рейдовые перевалочные комплексы.

До появления в 2010 году судов проекта RSD44, они были самыми большими в мире речными сухогрузными судами и полностью соответствовали поставленным при проектировании задачам.

Однако, средний возраст находящихся в работе сухогрузных судов типа «Волго-Дон» проекта 1565 уже составляет 39,5 лет, проектов 507, 507А, 507Б – 42 года, проекта 05074 – 27,2 года.

Безусловно, такой солидный возраст для грузовых судов, активно эксплуатирующихся, как в морских ограниченных районах, так и на внутренних водных путях, не может не оказать влияние на надежность их корпусов, устройств, систем и, соответственно, не раз уже приводил к авариям.

**Целью статьи** является оценка перспектив эксплуатации существующих сухогрузных судов типа «Волго-Дон» и «Волжский» на основе анализа происшедших с 1991 года по настоящее время аварий с корпусами и устройствами, а также с пожарами и взрывами.

**Изложение основного материала.** Сухогрузные суда проектов 507, 507Б, 1565, 05074М стальные, однопалубные, двухвинтовые грузозовые, без седловатости, с двойным дном высотой 900 мм, с наклонными двойными бортами шириной 1680-2150 мм, с полубаком, с машинным отделением, жилой и рулевой рубками, расположенными в корме, с 1, 2, 4 грузовыми трюмами, предназначены для перевозки угля, концентратов, апатитов, зерна, соли, леса и генеральных грузов.

Мидель-шпангоут судна приведен на рисунке 1. Шпация поперечного набора в средней части составляет 600 мм, расстояния между продольными балками 500-550 мм, рамная шпация в средней части 1800 мм.

Для судового корпуса были использованы следующие марки стали:

- легированная сталь МК-35, предел текучести 343 МПа (продольные комингсы, ширстрек, палубный настил и продольные ребра в районе шп. 20-184);

- сталь с пределом текучести 235 МПа (для прочих конструкций).

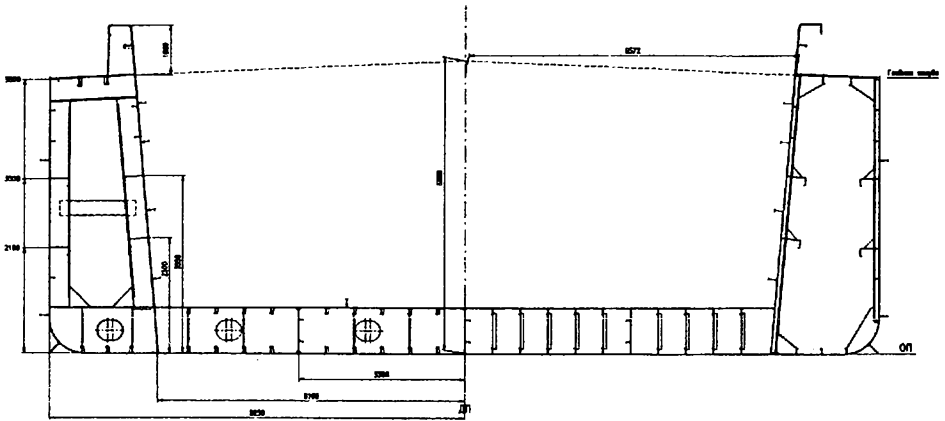
Система набора – смешанная – палуба и днище в районе грузовых трюмов набраны по продольной системе, остальные по поперечной.

Толщины листов обшивки: бортов – 8, 9 мм, днища – 7, 8 мм; палубы – 6, 8, 10 мм; ледовый пояс в носовой части – 10 мм. Толщина настила второго дна – 10 мм. Основной набор (шпангоуты, продольные ребра жесткости второго дна, днища, верхней палубы) сделан из полособульбов 12. Толщина стенки флора, днищевого стрингера, рамного шпангоута, бортового стрингера, рамного бимса – 7 мм. Толщина стенки вертикального киля – 7 мм. Рамные шпангоуты в районе грузовых трюмов установлены через три шпации.

Как отмечалось в [1], при создании конструкции с двойным дном и двойными бортами с высокой степенью раскрытия палубы широко

применялся расчетный метод, так как действовавшие тогда правила класса не распространялись на такие решения.

Серия непрерывно совершенствовалась – появились проекты 507Б, 1565, 05074М и др.



*Рис. 1. Мидель-шпангоут судна типа «Волго-Дон»*

На первых судах грузовое пространство было разделено на 4 трюма. На некоторых проектах от поперечных переборок в дальнейшем отказались (длина единого трюма стала более 90 м). Для уменьшения изгибающих моментов при переходах в балласте в районе миделя был установлен диптанк, судно стало двухтрюмным.

Для защиты от забрызгивания грузов при переходе через Ладожское и Онежское озера были установлены облегченные люковые закрытия (допускаемое давление 0,20 МПа на нагрузку от снега и льда во время зимнего перестоя).

Начиная с «Волго-Дона 25», на судах серии стали устанавливать дизеля советского производства 6ЧРН 36/45.

Суда проекта 1565 и 05074М строились на класс «О-пр» Речного Регистра и допускались к эксплуатации в крайне ограниченных морских районах (например, в Черном море в пределах 5-ти мильной прибрежной зоны от п. Одесса до Дунайской прорвы в сезон март-октябрь, а также от п. Очаков до п. Одесса и от п. Очаков до п. Скадовск в сезон март-ноябрь) при ограничении допускаемой высоты волны 3 % обеспеченности до 2 м и грузоподъемности до 5000 т.

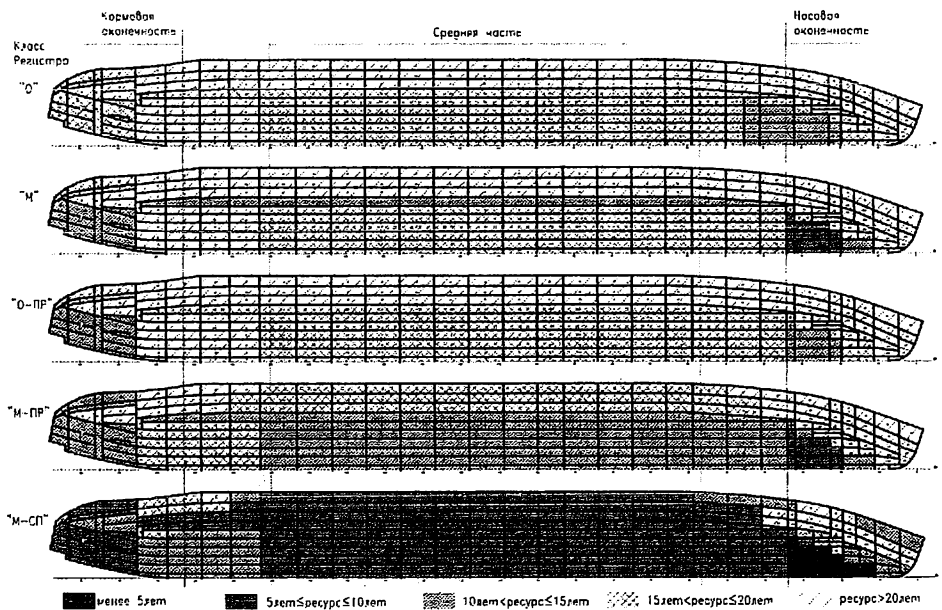
В 1993 году ЦКБ «Вымпел» и в 1994 году АО «ИЦС» (бывшее НПО «Судостроение») разработали проекты модернизации указанного типа судов на класс «М-СП» Речного Регистра.

Но изначально суда проектировались по требованиям класса «О», соответственно ресурс по износу при условии работы корпуса в этом же классе составляет, как правило, 20-25 лет и более.

Експлуатація в класі «М» (т.е. через Ладугу й Онегу) знизила ресурс всіх поясів зовнішньої обшивки товщиною 7 мм до 19 лет, а в носовій оконечності до 10 лет.

По нисходящій, при забезпеченні вихода судов в море в класі «М-ПР» – ресурс склав від 15 лет, в класі «М-СП» – від 8 лет (но не більше 19 лет).

Понятно, що маючи по ще знаходящимся в роботі судам середній вік близько 40-42 лет, експлуатацію в класах сумішного река-море плавання судов типу «Волго-Дон» (а судя по фактичним ремонтам і судов типу «Волжський») можна представити тільки після суттєвого ремонту, з заміною в итоге більше 50% обшивки (см. рисунок 2).



*Рис. 2. Изменение ресурса обшивки судна проекта 507Б, в зависимости от района его эксплуатации*

Несколько лучше обстоит дело с конструкцией двойного дна, но и там ресурс в море ограничивается 10-15 годами, что собственно и наблюдается на практике.

Если добавить к обычным износам еще и классическую повреждаемость настила второго дна грейферами, а также износы настила второго дна и нижних поясів второго борта и поперечных переборок при перевозке агрессивных грузов типа серы, то в целом мы имеем дело с очень большими объемами ремонта.

Вероятно, мы не откроем большого секрета из того, что ряд частных судовладельцев уже изобрел некую формулу «успеха» – надо ремонтировать либо внутренний контур (второе дно – второй борт), либо зовнішню обшивку.

В итоге, на сегодняшний день из 119 сухогрузных судов типа «Волго-Дон» проектов 507, 507А, 507Б (строились в 1960-1980 годах) списано 39 % – 46, причем 4 были потеряны в катастрофах, а сданы на металлолом 42 со средним возрастом 37,8 лет. В эксплуатации сейчас находится 51 судно со средним возрастом 42 года, в отстое – 22 средним возрастом 46,3 года. Основной график списания судов имеет линейный характер – см. рисунок 3. Суда сейчас работают, как правило, на реке.

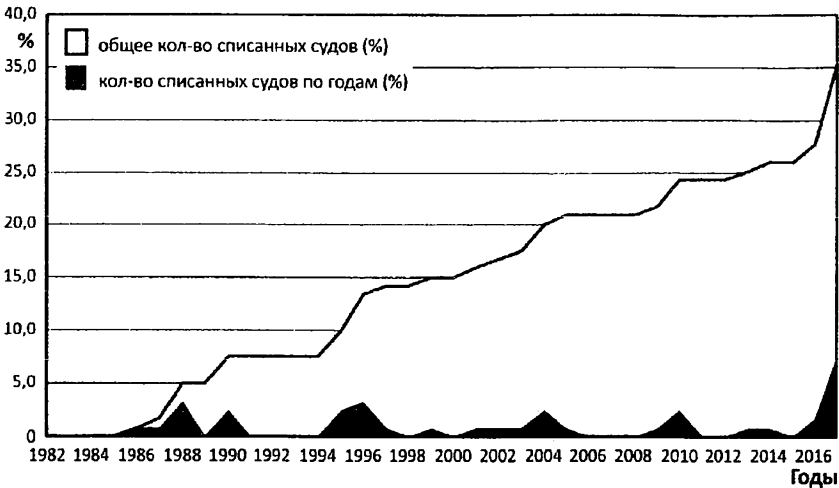


Рис. 3. Количество списанных судов в % соотношении от всех судов проектов 507А, Б типа «Волго-Дон»

Однако в 2017 году было списано сразу 9 судов (см. рисунок 4), что является признаком физического старения корпуса, так как сам тип таких судов востребован на рынке [8].

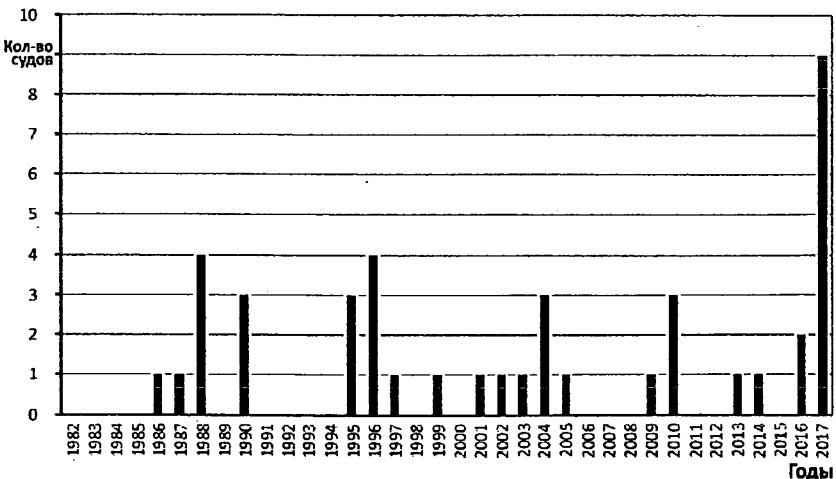


Рис. 4. Количество утилизированных судов проектов 507А, Б типа «Волго-Дон» с распределением по годам

Из 108 сухогрузных судов типа «Волго-Дон» проекта 1565 (строились в 1968-1990 годах) списано 17 % – 18, причем 5 были потеряны в катастрофах, а сданы на металлолом 13 со средним возрастом 34,7 года.

В эксплуатации сейчас находятся 81 судно со средним возрастом 39 лет, в отстое – 9 средним возрастом 44,6 года. Под флагом России работает 66 судов этого типа.

Всего авторами было обработано 146 аварий и катастроф с судами, находившимися под надзором РРР и РС, а также других классификационных обществ. Суда имели ограничения по величине высоты волны 1 % обеспеченности [ $h_{1\%}$ ] от 1,5 до 2,0 м и 3 % обеспеченности [ $h_{3\%}$ ] от 1,5 до 4,5 м.

Согласно с [3] по степени повреждений, нанесенных людям, окружающей среде и техническим средствам, указанные ситуации условно классифицированы 5 уровнями последствий (см. таблицу 1). Формальная оценка последствий обозначается величиной  $C$ , определяемой по 5-балльной шкале.

*Таблица 1*

*Классификация последствий аварий и аварийных ситуаций с судами типа «Волго-Дон» и «Волжский»*

Уровень последствий $C$	Количество рассмотренных происшествий и катастроф	Степень повреждения		
		воздействие на людей	воздействие на окружающую среду	повреждение технических средств
1 – Light Incident	82	Нет	Нет	Ничтожное
2 – Incident	40	Лёгкое телесное повреждение	Ничтожное	Незначительное
3 – Casualty	8	Серьезное, необратимое телесное повреждение	Существенное	Серьезное
4 – Serious Casualty	15	Потеря человеческой жизни	Критическое	Значительное
5 – Very Serious Casualty	1	Много человеческих жертв	Катастрофическое	Гибель судна

В таблице 2 дана предложенная в [4] и расширенная в [5; 6] краткая классификация основных групп идентифицированных опасностей, имеющих значение для исследования надежности и безопасности судов внутреннего и смешанного река-море плавания.



Таблиця 2

*Идентифицированные опасности для судов  
типа «Волго-Дон» и «Волжский»*

Номер	Опасности	$F_{AB}, \%$	$F_{КАТ}, \%$
<b>1</b>	<b>Опасности, связанные с техническим состоянием корпуса, машин, механизмов и систем судна</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
1.1	Несоответствие технологий, уровня качества и допускаемых дефектов речного судостроения требованиям для морской эксплуатации	8,22	56,25
1.2	Водотечность наружной обшивки, настила второго дна, обшивки второго борта, обшивки поперечных переборок, стенок цистерн	32,19	100
1.3	Нарушение технологии при выполнении построечных, ремонтных и модернизационных работ	81,51	43,75
1.4	Пропуски дефектов при дефектации корпуса, машин, механизмов и устройств	76,71	93,75
1.5	Ошибки проектировщиков	0,7	-
1.6	Неисправности и выход из строя машин и механизмов	23,97	37,5
1.7	Большие объемы замен корпусных конструкций при ремонте	9,59	18,75
1.8	Невыполнение требований международной конвенции по грузовой марке в отношении локсовых крышек, комингсов и конструкций воздушных труб, вентиляторов, непроницаемых дверей	5,48	25
1.9	Неисправности и выход из строя якорного устройства	6,16	6,25
1.10	Неисправности и выход из строя судовых систем	2,74	6,25
1.11	Неисправности и выход из строя рулевого устройства	50,69	6,25
1.12	Неисправности и выход из строя грузового устройства	-	-
<b>2</b>	<b>Опасности, связанные с нарушениями технологии перевозки груза</b>	<b>8,9</b>	<b>50,0</b>
2.1	Перевозка металлолома	6,85	31,25
2.2	Перевозка взрывоопасных грузов	-	-
2.3	Грузовые операции с применением грейферов, тяжелых погрузчиков и бульдозеров	5,48	25
2.4	Нарушение порядка погрузки/выгрузки в порту, «Инструкции по загрузке», «Наставления по креплению грузов», «Информации об остойчивости»	6,85	37,5

Продолжение табл. 2

Номер	Опасности	$F_{AB}, \%$	$F_{КАТ}, \%$
3	<b>Опасности, связанные с действиями судовладельца, береговых операторов и экипажа</b>	<b>84,9</b>	<b>100,0</b>
3.1	Балластировка, не соответствующая указаниями «Инструкции по загрузке и балластировке»	2,06	6,25
3.2	Сознательное нарушение установленных ограничений по району, сезону плавания	15,07	43,75
3.3	Сознательные и кратковременные посадки на мель, выморозка	6,16	6,25
3.4	Навигационные ошибки	32,88	68,75
3.5	Контакт с льдом, контакт со стенками причалов и шлюзов, столкновение с другим судном	34,25	31,25
3.6	Халатное отношение служб порта, бассейнового управления, СРЗ	49,32	56,25
3.7	Ошибка прогноза	30,82	68,75
3.8	Перегруз судна	1,37	12,5
3.9	Смена судовладельца	17,12	50
3.10	Сознательная эксплуатация при негодном т/с	2,06	18,75
3.11	Нарушение условий перегона, буксировки	2,74	12,5
3.12	Нарушение безопасного режима отстоя судов	3,43	12,5
3.13	Халатность экипажа, несоблюдение им ЭТД, ПТЭ	53,43	50

Общая частота возникновения опасности во всех исследуемых случаях определяется как  $F_{AB} = N_I / N_{AB}$ , частота возникновения опасности для наиболее тяжелых случаев (катастроф), имеющих уровни последствий  $C = 4$  и  $C = 5$   $F_{КАТ} = N_I / N_{КАТ}$ , где  $N_I$  – число аварийных ситуаций, где имела место  $i$ -я опасность,  $N_{AB}$  – количество всех изучаемых аварий,  $N_{КАТ}$  – количество катастроф.

Обращает на себя внимание тот факт, что ряд опасностей имеет  $F_{КАТ} > F_{AB}$ , что свидетельствует об их значительной роли в увеличении степени тяжести последствий событий.

Среди них несоответствие технологий, уровня качества и допускаемых дефектов речного судостроения требованиям для морской эксплуатации (опасность 1.1) и близкая к ней по сути опасность 1.7 – большие объемы замен корпусных конструкций при ремонте; водотечность непроницаемых конструкций (опасность 1.2) и близкая к ней по сути опасность 1.8 – невыполнение условий МК-66 (т.е. потенциальная водотечность); опасность 2.1 – перевозка металлолома, 2.3 – применение грейферов, 2.4 – нарушения во время погрузочно-разгрузочных работ.

Отмечается существенная доля в событиях, имеющих последствия  $C = 4$  и  $C = 5$ , человеческого фактора в виде ошибок при проведении дефектации (опасность 1.4), при эксплуатации судна (опасности 3.2, 3.4, 3.7, 3.10).

Особую роль играет смена судовладельца (опасность 3.9), которая сопутствует значительному числу катастроф. Можно сказать, что именно переход судов из классических структур пароходств в небольшие частные компании инициирует значительную часть других опасностей (см., например, опасности 1.2, 1.3, 3.6, 3.13).

Суда типа «Волго-Дон» и «Волжский» в связи с их пониженным стандартом прочности при эксплуатации в море (в непереоборудованном состоянии), имеют меньшие запасы прочности, чем аналогичные суда неограниченного района плавания. Поэтому все факторы, приводящие к запроектному росту усилий на тихой воде и на волнении – опасности 1.1, 3.2, 3.3, 3.7, 3.8 – отражаются на тяжести последствий воздействия на корпус рассматриваемых судов этих опасностей.

Суда работают в тяжелых условиях мелководья и частых шлюзований (до 30 в одном рейсе) летом и в ледовой обстановке зимой (если имеют классы смешанного река-море плавания), что повышает весомость опасности 3.5, т.к. она в силу накопления деформационных повреждений и истирания наружной обшивки снижает несущую способность корпусов судов.

Обобщенные данные таблицы 2 сформированы на основании обработки аварий и аварийных происшествий (для случаев с  $C = 1$ ,  $C = 2$  и  $C = 3$  примеры анализа приведены в таблице 3, для случаев с  $C = 4$  и  $C = 5$  примеры анализа приведены в таблице 4).

Все из рассмотренных 146 случаев были проанализированы на основе тех данных, которые имелись в распоряжении (начиная с 1991 года), а также с помощью математического моделирования разных сценариев развития событий путем построения деревьев отказов (причин) и деревьев событий (последствий). Полученные здесь выводы не всегда совпадают с официальными заключениями и носят сугубо исследовательский характер.

В таблицах 3 и 4 по каждой опасности указан по 3-бальной шкале коэффициент относительной ответственности (весомости) в рассматриваемом случае. По результатам исследования методами теории риска каждого происшествия назначались: балл «3» – опасность прямого действия, непосредственно приведшая к аварии; балл «2» – опасность косвенного действия, вызвавшая к жизни опасности с баллом «3»; балл «1» – фоновые опасности, оказавшие неблагоприятное воздействие на ситуацию.

Для каждой опасности был определен обобщенный уровень риска судов  $R$ , который определялся как произведение вероятности возникновения опасности  $F$  на последствия воздействия указанной опасности на объект  $C$ . Условная вероятность  $F$  определялась по 5-бальной шкале («1» – частота возникновения в 0-20 % аварийных случаях, «2» – 21-40 %, «3» – 41-60 %, «4» – 61-80 %, «5» – 81-100 %).

Таблиця 3

*Идентифікація і послідовність аварій судів типу «Волго-Дон» і «Волжський» (приклади)*  
*способів зрівноважених аварій судів типу «Волго-Дон» і «Волжський» (приклади)*

№ п/п	Проект, назва, дата побудови, вік на момент аварії, дата аварії, [t <sub>ав</sub> ]	Вид оповістки (номера см. в тексті статті) і відповідальна відповідальність																Опис аварійних наслідків																
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	2.1	2.2	2.3	2.4		3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	3.11	3.12	3.13			
1	Пр. 1565, Палладій, 1984, 19 лет, 21.01.2003, [t <sub>ав</sub> ] = 2,5 м		1																		2	3											2	Деформація корпусних конструкцій. Експлуатація в ледових умовах. (2)
2	Пр. 1565, Волго-Дон 5069, 1977, 26 лет, 05.11.2003, [t <sub>ав</sub> ] = 2 м		2	1	1														3		3										2	Деформація корпусних конструкцій, тріщини, пробиття. Нарудження встро-вольного режма. (2)		
3	Пр. 507Б, 30 лет Победы, 1975, 1991, 10 лет, 23.10.1992, [t <sub>ав</sub> ] = 2 м		2	1							3											2											Поломка гребного вала. Неякісний ремонт. (1)	
4	Пр. 05074М, Владімір Філіков, 1991, 10 лет, 11.07.2001, [t <sub>ав</sub> ] = 3,5 м			1							3											2											Потеря гребного ванта. Неякісний монтаж. (2)	
5	Пр. 1565, Волго-Дон 5056, 1974, 25 лет, 23.03.1999, [t <sub>ав</sub> ] = 2,5 м		1	2																		3										1	Пожар во время сварочных работ. (2)	

Таблица 4

## Идентификация и последствия аварий, способствовавших катастрофам судов типа «Волго-Дон» и «Волжский» (примеры)

№ п/п	Проект, название, дата постройки, возраст на момент аварии, дата аварии, [t <sub>3%</sub> ]	Вид опасности (номера см. в тексте статьи) и относительная ответственность											Описание последствий																						
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11		1.12	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	3.11	3.12	3.13				
1	Пр. 1565, Волго-Дон 5076, 1980, 22 года, 15.05.2002, [t <sub>3%</sub> ] = 2,5 м	1	3					1										1		2	3														Затонул. Навал на опору Саратовского моста. (4)
2	Пр. 1565, Волго-Дон 5016, 1969, 39 лет, 01.07.2008, [t <sub>3%</sub> ] = 2 м	2		1				1												2	3													Затонул. Судоводительская ошибка. (4)	
3	Пр. 507Б, Волго-Дон 145, 1971, 30 лет, 05.10.2001, [t <sub>3%</sub> ] = 2 м	2	1	1						2	1										3	2												Затоплено МО из-за полученной пробойны, пожар в надстройке из-за короткого замыкания при затоплении. (4)	
4	Пр. 507Б, Волго-Дон 107, 1969, 37 лет, 17.07.2006, [t <sub>3%</sub> ] = 2 м		3		1																	1	3	2	1								Затонул от удара в борт другим судном. Пьяный судоводитель т/х «Капитан Соловьев». (4)		
5	Пр. 0507АМ, Стрелец, 1990, 13 лет, 03.02.2003, [t <sub>3%</sub> ] = 3,5 м	3	2	1	2																	2					1							Перелом корпуса во время рейса, затопление. Нарушение района плавания. (5)	

В таблице 5 представлена формальная оценка риска, полученная в двух вариантах: на основе всех рассмотренных аварийных ситуаций и для катастроф.

На основе данных таблицы 5 были построены матрицы риска судов типа «Волго-Дон» и «Волжский»: на рисунке 5 – для всех аварийных случаев и происшествий, исследуемых в статье и на рисунке 6 – для катастроф.

Анализ рисунков 5 и 6 позволяет сделать следующие выводы о ранжировании опасностей:

- наибольшую опасность судов типа «Волго-Дон» и «Волжский» представляют опасности 1.2 (фактическое обеспечение непроницаемости корпусных конструкций), 3.2 (нарушение ограничений), 3.5 (контакты со льдом, со стенками причалов и шлюзов, столкновения с другими судами);

- опасность 1.1 (несоответствие технологий, уровня качества и допускаемых дефектов речного судостроения требованиям для морской эксплуатации) и опасность 2.4 (нарушение «Инструкции по загрузке») имеют достаточно высокий формальный уровень риска, как по частоте, так и по последствиям, относятся к т.н. зоне «ALARP», т.е. находятся в пределах минимально практически допустимого риска;

- 3.3 (посадки на мель), 3.11 (нарушение условий буксировки или перегона) относятся к зоне «ALARP» за счет тяжести последствий;

- опасности 3.4 (навигационные ошибки), 1.4 (пропуски дефектов при дефектации), 3.7 (ошибки прогноза) относятся к зоне «ALARP» за счет высокой частоты возникновения.

Согласно подходам, принятым в методе формализованной оценки безопасности [2; 4], опасности, которые отнесены по уровню риска к зоне «недопустимого риска», должны быть подвергнуты процедуре управления риском (снижения частоты и/или последствий) при любом уровне затрат, требуемых для этого. Опасности из зоны «ALARP» требуют проведения технико-экономического анализа, с определением оптимальных по стоимости мероприятий по снижению уровня риска.

Решение задачи управления риском судов типа «Волго-Дон» и «Волжский» при воздействии опасности 1.2 лежит в сфере организационно-технических мероприятий при проведении наблюдения за фактическим состоянием корпусов судов при эксплуатации.

На основании статистики были построены графические зависимости числа аварий и катастроф от возраста судна (см. рисунок 7) и распределение по годам (см. рисунок 8).

На рисунке 7 наблюдается устойчивый рост аварийности для судов старше 15 лет с пиком аварий для судов с возрастом 23-26 и 33-40 лет. Полученные данные можно считать не совсем полными, так как отсутствуют в необходимом для статистики объеме данные по аварийным происшествиям до 1991 года.

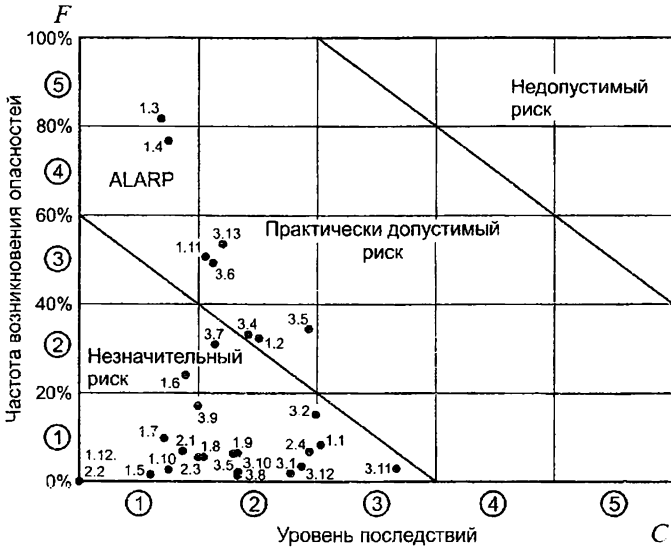


Рис. 5. Матрица риска судов типа «Волго-Дон» и «Волжский» (для всех исследованных аварий)

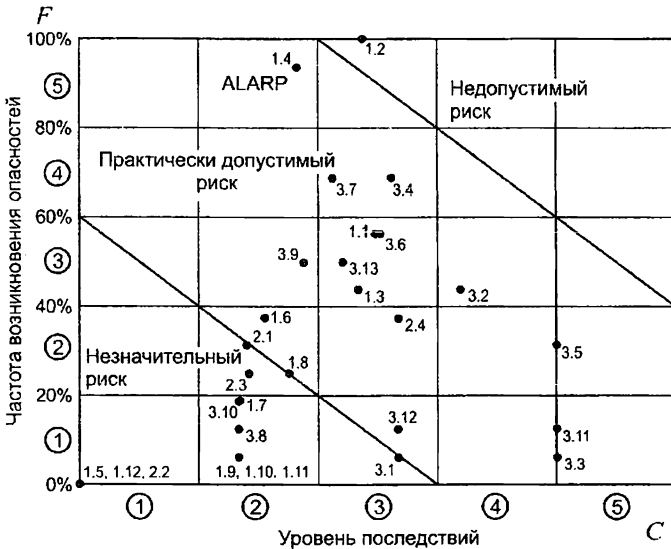


Рис. 6. Матрица риска судов типа «Волго-Дон» и «Волжский» (для катастроф)

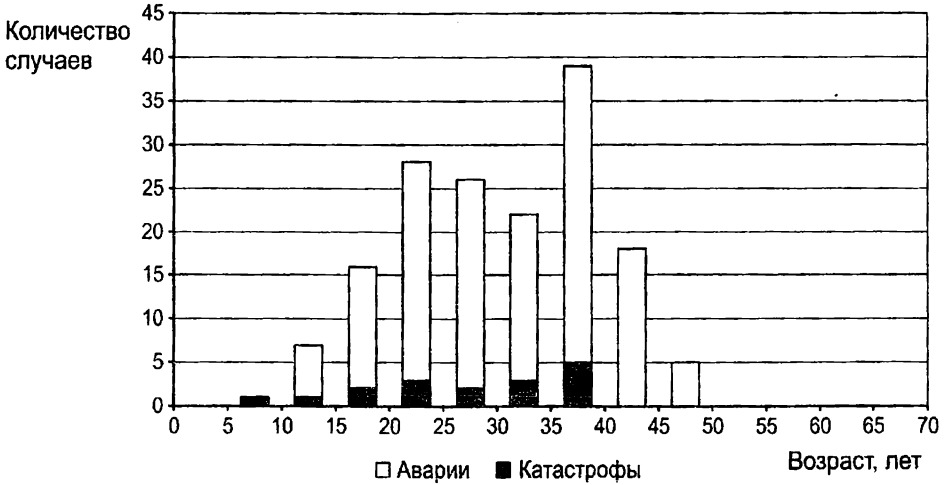
Рисунок 8 позволяет отметить рост аварийных случаев, начиная с 2000 года (!!!!). Максимальное количество аварийных случаев приходится на 2002, 2003, 2008, 2016 годы (11-12 случаев в год).

Таблиця 5

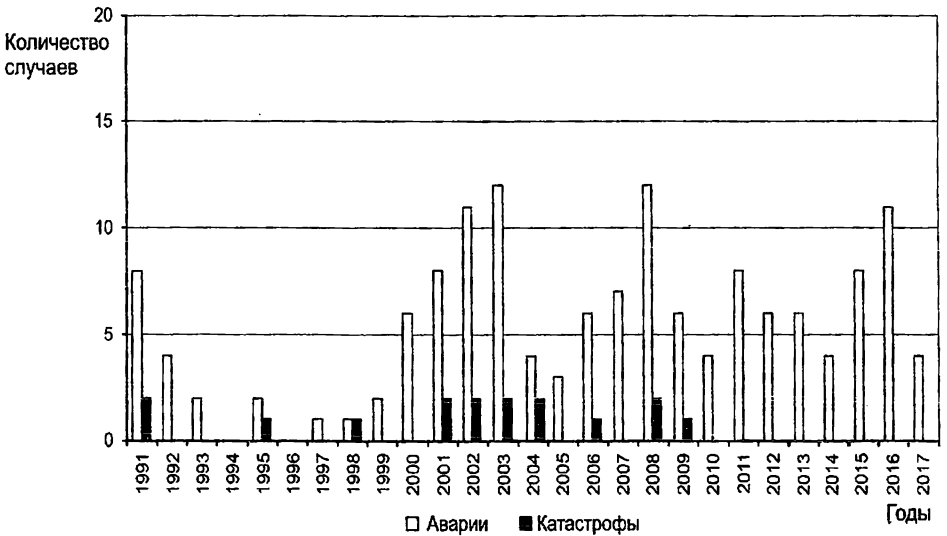
*Формальная оценка риска судов типа «Волго-Дон» и «Волжский»*

Опасность	Все случаи			Катастрофы		
	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>R</i>
1	2	3	4	5	6	7
1.1	0,411	2,028	0,833	2,813	2,481	6,979
1.2	1,61	1,511	2,432	5	2,375	11,875
1.3	4,075	0,686	2,797	2,188	2,333	5,104
1.4	3,836	0,75	2,877	4,688	1,822	8,542
1.5	0,034	0,667	0,023	0	-	-
1.6	1,199	0,895	1,073	1,875	1,556	2,917
1.7	0,479	0,714	0,342	0,938	1,333	1,25
1.8	0,274	1,042	0,285	1,25	1,75	2,188
1.9	0,308	1,333	0,411	0,313	1,333	0,417
1.10	0,137	0,75	0,103	0,313	1,333	0,417
1.11	2,534	1,059	2,683	0,313	1,333	0,417
1.12	0	-	-	0	-	-
2.1	0,342	0,867	0,297	1,563	1,4	2,188
2.2	0	-	-	0	-	-
2.3	0,274	1	0,274	1,25	1,417	1,771
2.4	0,342	1,933	0,662	1,875	2,667	5
3.1	0,103	1,778	0,183	0,313	2,667	0,833
3.2	0,753	1,985	1,495	2,188	3,19	6,979
3.3	0,308	1,296	0,4	0,313	4	1,25
3.4	1,644	1,417	2,329	3,438	2,606	8,958
3.5	1,712	1,927	3,299	1,563	4	6,25
3.6	2,466	1,125	2,774	2,813	2,519	7,083
3.7	1,541	1,141	1,758	3,438	2,121	7,292
3.8	0,068	1,333	0,091	0,625	1,333	0,833
3.9	0,856	1	0,856	2,5	1,875	4,688
3.10	0,103	1,333	0,137	0,938	1,333	1,25
3.11	0,137	2,667	0,365	0,625	4	2,5
3.12	0,171	1,867	0,32	0,625	2,667	1,667
3.13	2,671	1,205	3,219	2,5	2,208	5,521





*Рис. 7. Зависимости количества аварий и катастроф от возраста судна*



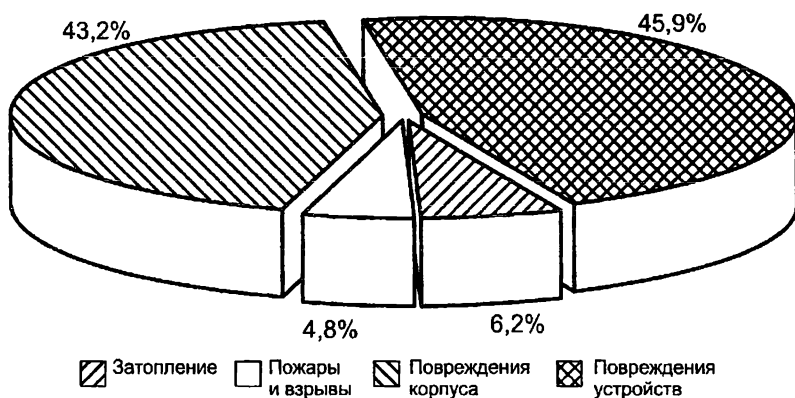
*Рис. 8. Распределение количества аварий и катастроф по годам*

Интерес представляет также распределение по классам аварий (см. таблицу 6). Графически роли различных классов аварий представлены на рисунках 9, 10, 11. Как видно из таблицы 6, при всех уровнях последствий 45,9 % всех аварий приходится на повреждения устройств, 43,2 % на повреждения корпуса, на затопление чуть более 6 %, на пожары и взрывы менее 5 %.

Таблица 6

*Распределение по классам аварий*

Класс аварии	Затопление	Пожары и взрывы	Повреждения корпуса	Повреждения устройств	$\Sigma$
<b>Аварии и катастрофы</b>					
Количество	9	7	63	67	146
Относительная доля	6,2 %	4,8 %	43,2 %	45,9 %	100,0 %
<b>Аварии</b>					
Количество	0	5	58	67	130
Относительная доля	0,0 %	3,8 %	44,6 %	51,5 %	100,0 %
<b>Катастрофы</b>					
Количество	9	2	5	0	16
Относительная доля	56,3 %	12,5 %	31,3 %	0,0 %	100,0 %
<b>Относительная опасность класса аварии</b>					
Доля аварий в общем количестве событий	0 %	71 %	92 %	100 %	
Доля катастроф в общем количестве событий	100 %	29 %	8 %	0 %	



*Рис. 9. Роль различных классов аварий (при всех уровнях последствий).*

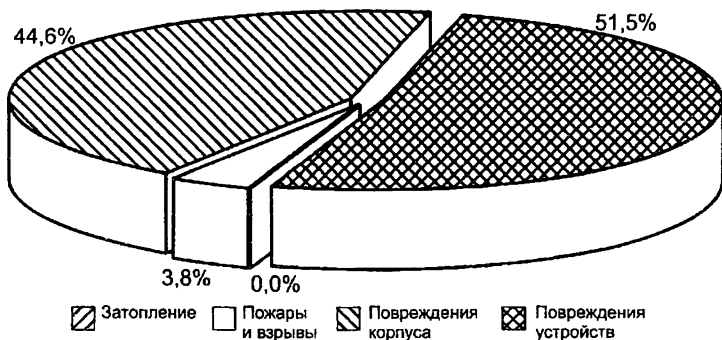


Рис. 10. Распределение типов аварийных ситуаций при авариях

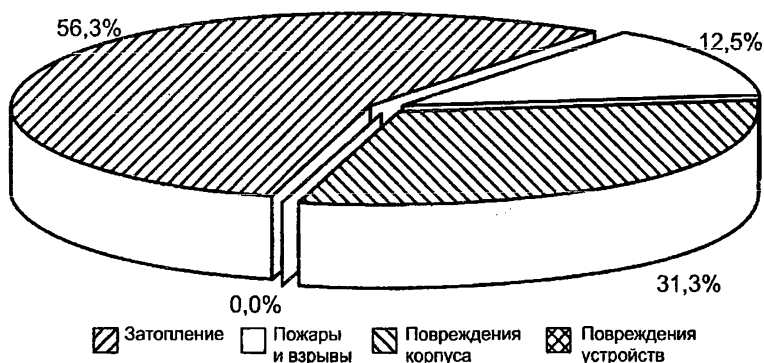


Рис. 11. Распределение типов аварийных ситуаций при катастрофах

Таблица 7

*Прогноз выбытия судов типа «Волго-Дон» / «Волжский»  
на июнь 2017 года*

Проект	Прогнозируемый год выбытия серии	Остаточный ресурс, лет	Количество действующих судов на 2017 г., ед.	Прогноз количества судов на 2020 г., ед.	Прогноз количества судов на 2025 г., ед.
Волго-Дон (пр. 507А, 507Б)	2030	13,0	51	38	14
Волго-Дон (пр. 1565)	2034	17,0	81	70	56
Волжский (пр. 05074)	2036	19,0	47	40	27
Всего			179	148	97

За анализируемый промежуток времени (с 1991 года по настоящее время) произошло 16 катастроф (из них больше половины приходится на затопление, почти треть на повреждения корпуса и 12,5 % на пожары и взрывы). Не зафиксировано ни одного события, связанного с повреждениями устройств, которое привело бы к катастрофе.

Если не брать во внимание нарастающие проблемы в техническом состоянии, то исходя из статистически определенных закономерностей списания по каждому проекту, то из 179 сухогрузных судов типа «Волго-Дон»/«Волжский» к 2020 году останется 148, к 2025 год – 97. Однако скорее всего эти оценки являются весьма оптимистичными, так как потребуют значительного увеличения финансирования ремонта этих судов, включая замены машин и механизмов, что пока еще не делается.

**Выводы.** На сегодняшний день из 119 сухогрузных судов типа «Волго-Дон» проектов 507, 507А, 507Б (строились в 1960-1980 годах) списано 39 % – 46, причем 4 были потеряны в катастрофах, а сданы на металлолом 42 со средним возрастом 37,8 лет. В эксплуатации сейчас находится 51 судно со средним возрастом 42 года, в отстое – 22 средним возрастом 46,3 года. Основной график списания судов имеет линейный характер. Суда сейчас работают, как правило, на реке.

Однако в 2017 году было списано сразу 9 судов, что является признаком физического старения корпуса, так как сам тип таких судов востребован на рынке.

Из 108 сухогрузных судов типа «Волго-Дон» проекта 1565 (строились в 1968-1990 годах) списано 17 % – 18, причем 5 были потеряны в катастрофах, а сданы на металлолом 13 со средним возрастом 34,7 года. В эксплуатации сейчас находятся 81 судно со средним возрастом 39 лет, в отстое – 9 средним возрастом 44,6 года. Под флагом России работает 66 судов этого типа.

Изначально суда проектировались по требованиям класса «О», соответственно ресурс по износу при условии работы корпуса в этом же классе составляет, как правило, 20-25 лет и более, но ведь сейчас им уже в среднем 40-42 года.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Евстифеев В.А., Рабазов Ю.И., Русенко А.П. Теплоходы типа «Волго-Дон» – основа речного грузового флота страны // Судостроение. – 1986. – № 11. – С. 3-6.
2. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
3. Егоров Г.В. Развитие требований к средствам контроля загрузки морских и смешанного плавания судов // Автоматизация судовых технических средств: Научн.-техн. сб. – Вып. 5. – Одесса: ОГМА, 2000. – С. 36-53.

4. Егоров Г.В. Исследование риска при эксплуатации судов смешанного плавания // Сб. научн. трудов УГМТУ. – Николаев: УГМТУ, 2000. – № 5. – С. 49-59.
5. Егоров Г.В., Егоров А.Г. Анализ риска и надежности нефтеналивных судов типа «Волгонефть» проектов 558/550 и 1577/550А // Морской вестник. – 2013. – № (47). – С. 39-45.
6. Егоров А.Г. Анализ причин и последствий аварий судов внутреннего и смешанного плавания за 1991-2010 годы // Проблемы техники. – 2011. – № 1. – С. 3-30.
7. Егоров Г.В., Егоров А.Г. Суда смешанного река-море плавания и внутреннего плавания: роль «старых» серий судов и их перспективы // Морская Биржа. – 2017. – № 1 (59). – С. 18-30.
8. Егоров Г.В., Егоров А.Г. Фактическое списание судов смешанного река-море плавания и прогноз утилизации судов до 2025 года. Типы судов, востребованные рынком // Морская Биржа. – 2017. – № 3 (61). – С. 30-36.

*Стаття надійшла до редакції 20.11.2017*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, професор, завідувач кафедри «Машинознавство» Одеського національного морського університету  
**А.В.Конопльов**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету  
**А.В.Гришин**

УДК 167.23:629.545

Г.В. Егоров, А.В. Демидюк, В.И. Тонюк

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЗАЛИВАЕМОСТИ КРАНОВОГО СУДНА С ТРЮМОМ,  
НЕ ОСНАЩЕННЫМ ЛЮКОВЫМИ ЗАКРЫТИЯМИ**

*На базе существующей методики проведения испытаний по оценке заливаемости контейнерных судов типа «open top» разработана методика оценки заливаемости судна с трюмом для навалочных грузов. Выполнена экспериментальная оценка заливаемости кранового судна с трюмом, не оснащенного люковыми закрытиями. Подтверждена правильность принятых проектных решений.*

**Ключевые слова:** *опытовый бассейн, экспериментальное исследование заливаемости, крановое судно, судно с трюмом без люковых закрытий, регулярное волнение.*

*На базі існуючої методики проведення випробувань з оцінки заливання контейнерних суден типу «open top» розроблена методика оцінки заливання судна з трюмом для масових вантажів. Виконана експериментальна оцінка заливання кранового судна з трюмом, що не обладнаний люковими закриттями. Підтверджена правильність прийнятих проектних рішень.*

**Ключові слова:** *дослідний басейн, експериментальне дослідження заливання, кранове судно, судно з трюмом, який не обладнаний люковими закриттями, регулярне хвилювання.*

*On the basis of the existing testing methodology the technique for the experimental evaluation of green water ingress into a hold of an open-top crane vessel was developed. The correctness of the design decisions was confirmed.*

**Keywords:** *towing tank, experimental study of green water ingress, crane vessel, open top vessel, regular waves.*

Процедура оценки заливаемости трюмов судов без люковых закрытий существует только для контейнерных судов типа «open top» [1]. Как правило, такие суда являются крупными контейнеровозами «открытого типа» – с большим раскрытием палубы, а также с избыточной высотой надводного борта. Отсутствие люковых закрытий на таких судах положительно влияет на контейнеровместимость, однако требует применения дополнительных технических и проектных решений, обеспечивающих безопасность эксплуатации судна.

Несмотря на то, что первый балкер «open top»-концепции был построен в 1962 году, применение указанной концепции не получило распространения и носит скорее характер перспективных проектов [6].

**Постановка проблеми.** В Морском инженерном бюро (г. Одесса) разработан проект несамоходного кранового судна проекта CV03 с трюмом для навалочных грузов, не имеющим люкового закрытия. Функционально судно предназначено для проведения рейдовых перегрузочных работ в паре с крупнотоннажным балкером, осадка которого не позволяет ему подойти к причалу при полной загрузке.

Необходимость экспериментальной оценки заливаемости для судна без люковых закрытий, предназначенного для перевозки навалочных грузов, является актуальной задачей в свете того, что требования процедуры [1] не распространяются на суда для перевозки навалочных грузов. Однако, учитывая длительный опыт применения предложенной ИМО экспериментальной оценки [1], было принято решение рассматривать её требования как базовые условия проведения экспериментальных исследований.

**Целью исследований** являлась экспериментальная проверка выбранной концепции судна, правильности принятых проектных решений в части требований к заливаемости трюма, не оснащенного люковыми закрытиями.

**Изложение основного материала.** Крановое судно проекта CV03 представляет собой прямоугольный понтон с двойными бортами и двойным дном, кормовая и носовая оконечности – транцевые. Для защиты открытого люкового выреза устроены баковая и ютовая надстройки. Схема общего расположения судна представлена на рисунке 1.


Основные характеристики несамоходного кранового судна проекта CV03 представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

*Основные характеристики кранового судна проекта CV03*

Величина	Обозначение	Размерность	Численное значение	
			натурное судно	модель 1:50
1	2	3	4	5
Длина расчетная	L	м	63,65	1,273
Длина по КВЛ	L <sub>wl</sub>	м	63,65	1,273
Ширина по КВЛ	B	м	24,0	0,48
Осадка	D	м	5,60	0,112
Коэффициент общей полноты	C <sub>B</sub>	-	0,993	
Объемное водоизмещение	V	м <sup>3</sup>	8511,20	0,06809

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
Весовое водоизмещение	D	T	8723,75	0,06979
Абсцисса центра тяжести судна	$x_g$	M	-1,28	-0,026
Апplikата центра тяжести	$z_g$	M	5,72	0,1144
Метацентрическая высота поперечная	$h_0$	M	5,698	0,114
Поправка к метацентрической высоте	Dh	M	0,025	0,0005
Класс судна согласно Правил РМРС	KM  R3 Crane vessel			

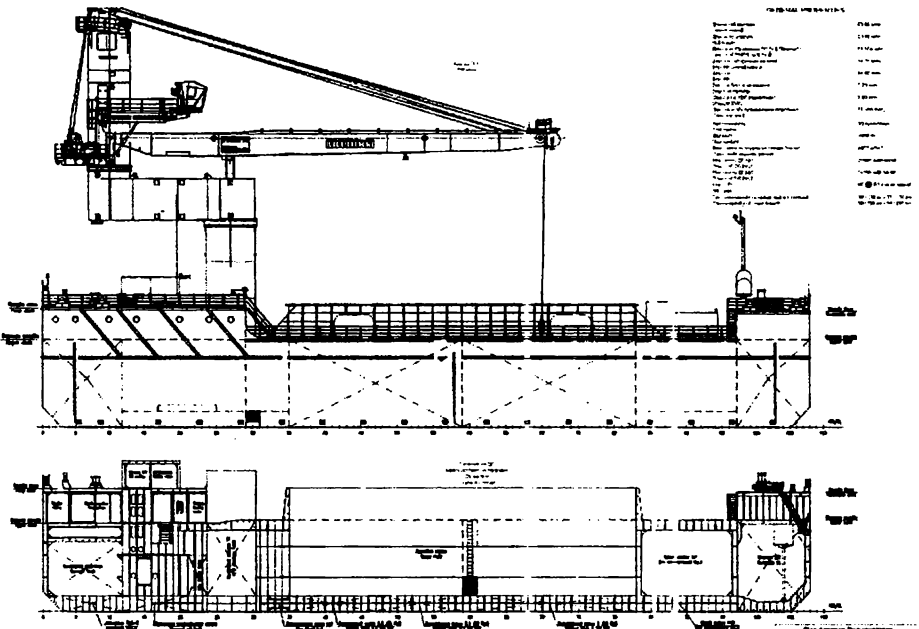


Рис. 1. Общее расположение самоходного кранового судна проекта CV03



Модель кранового судна изготовлена в масштабе 1:50 из фанеры и пенопласта и для придания жесткости усилена деревянными брусками. После сборки наружные поверхности модели покрыты слоем сплава парафина и воска. Процесс создания модели иллюстрирует рисунок 2. Общий вид модели кранового судна проекта CV03 в сборе представлен на рисунке 3.



*Рис. 2. Процесс создания модели кранового судна проекта CV03*



*Рис. 3. Общий вид модели кранового судна проекта CV03*

Поскольку целью проведения испытаний является оценка заливаемости – динамического следствия качки судна, перед началом испытаний была выполнена динамическая тарировка модели. Её целью являлось приведение в соответствие характеристик начальной остойчивости и инерционных характеристик судна и его модели.

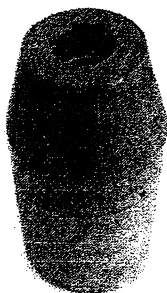
**Опыт кренования.** Для приведения в соответствие характеристик начальной остойчивости натурального судна и его модели были последовательно проведены несколько опытов кренования. Результаты последнего приближения приведены в таблице 2.

Таблица 2

*Результаты опыта кренования*

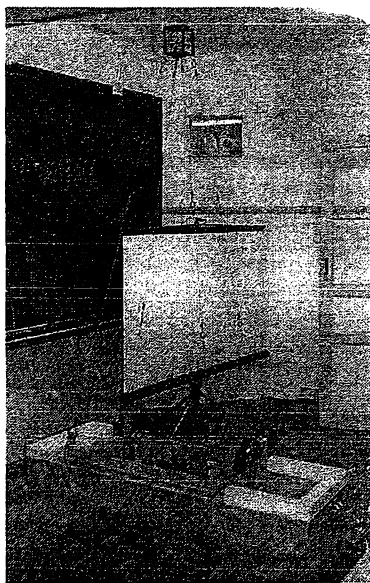
Номер опыта	Крен-балласт	Угол крена	Момент кренящий $M_{кр} = P_b$	МЦВ, $h_0$
	кг	градусы	кгм	м
1	0,200	0,640	0,090	0,1173
2	0,400	1,360	0,180	0,1094
3	1,400	4,460	0,630	0,1173
Плечо момента кренящего, $b = 0,450$ м				
Среднее значение поперечной МЦВ, $h_0 = 0,1146$ м				
Апplikата поперечного метацентра модели, $z_m = 0,2289$ м				
Фактическое значение апplikаты центра тяжести модели, $z_{gm \text{ факт}} = 0,1142$ м				
Относительная погрешность, $\varepsilon = \frac{ z_{gm} - z_{gm \text{ факт}} }{z_{gm}} = \frac{ 0,1144 - 0,1142 }{0,1144} = 0,158 \%$				

Система измерения углов крена построена на базе аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) общего назначения LCard L-14140, аналогового датчика крена, тензометрического усилителя 8АНЧ7М и персонального компьютера – центра обработки данных. Датчик крена построен на базе полумоста тензорезисторов, размещенных на подвижном элементе датчика, его общий вид приведен на рисунке 6. Тензометрический усилитель 8АНЧ7М осуществляет питание тензорезисторов датчика и усиление сигнала. Сигнал от датчика поступает на АЦП, обрабатывается и передается на персональный компьютер для формирования файла данных.



*Рис. 6. Датчик крена*

**Динамическая тарировка модели.** Коррекция моментов инерции масс модели выполнена методом свободных колебаний в воздухе. Модель крепилась к специальному подвесу фиксированной длины  $l$ . Общий вид модели на подвесе приведен на рисунке 7.



*Рис. 7. Модель на подвесе*

В процессе определения моментов инерции масс модели выполнены замеры периодов колебаний модели в воздухе в двух плоскостях – продольной и поперечной. Средний период во всех рассмотренных случаях определялся по замеренному времени полных 100 колебаний модели как физического маятника.

Таблиця 3

*Инерционные характеристики и натурального судна и его модели*

Наименование	Обозначение	Размерность	Продольные колебания, $i = y$	Поперечные колебания, $i = x$
Период колебаний модели	$\tau_{iM}$	с	2,7370	2,7011
Длина подвеса	$l$	м	1,787	1,787
Момент инерции масс модели	$I_{iM}$	кгмс <sup>2</sup>	0,9181	0,3213
Момент инерции масс натурального судна	$I_{iH}$	кгмс <sup>2</sup>	2,869E+08	1,004E+08
Радиус инерции масс натурального судна	$\rho_{iH}$	м	17,964	10,757
Относительный радиус инерции масс судна	$\bar{\rho}_i$	-	0,286	0,170

В таблице 3:

$l$  – длина подвеса (расстояние от точки подвеса до ЦТ модели);  
Момент инерции масс модели

$$I_{im} = \Delta_m l \left[ \left( \frac{\tau_{im}}{2\pi} \right)^2 - \frac{l}{g} \right], \text{ кгмс}^2.$$

Момент инерции масс натурального судна

$$I_{in} = I_{im} \lambda^5, \text{ кгмс}^2;$$

$$\rho_i = \sqrt{\frac{g I_{in}}{\lambda^3 \Delta_m}}, \text{ м};$$

$$\bar{\rho}_i = \frac{\rho_i}{L};$$

$$i = x, y, g = 9,81 \text{ м/с}^2, \lambda = 50.$$

**Регулярное волнение.** Выполнение требований процедуры [1] для судна, оснащенного пропульсивным комплексом, требует проведения самоходных испытаний модели в мореходном бассейне. Такие бассейны оснащены сложной системой волногенерации, обычно расположенной вдоль двух смежных сторон бассейна. Поскольку крановое судно проекта CV03 является несамоходным, то для проведения экспериментальных исследований достаточно возможностей опытового бассейна ОНМУ.

В настоящее время в опытовом бассейне ОНМУ отсутствуют возможности генерации нерегулярного волнения со спектрами JONSWAP,

Pierson-Moscovits и ISSC [5], которые рекомендованы в [1]. Учитывая класс судна, его район плавания R3 и назначение, было принято решение провести испытания на регулярном волнении, высота которого соответствует высоте 3 % обеспеченности нерегулярного волнения вероятного района эксплуатации судна. Известно [3], что такой подход является более жестким с точки зрения определяемых параметров качки.

Регулярное волнение в бассейне Одесского национального морского университета генерируется пластинчатым волнопродуктором, который приводится в действие с помощью электродвигателя мощностью 3 кВт. Электродвигатель оснащен блоком частотного управления «Schneider Electric», что позволяет регулировать частоту генерации волн с точностью до 0,1 Гц.

Параметры волн в эксперименте определялись с учетом длины модели  $L$  из отношения  $\frac{\lambda}{L}$ . В эксперименте рассмотрены две волны

$$\frac{\lambda}{L} = 2,5 \text{ и } \frac{\lambda}{L} = 2,0.$$

Высота расчетной волны для судна в эксперименте была фиксированной  $h = 6,0$  м, что несколько превышает расчетную высоту волны согласно району плавания R3. Исходя из того, что требования [1] регламентируют использование при физическом моделировании наиболее неблагоприятных параметров волнения, крутизна волны  $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{26,5}$  принята

для волны с  $\frac{\lambda}{L} = 2,5$ , и  $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{21,2}$  для волны с  $\frac{\lambda}{L} = 2,0$ . Крутизна волнения

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{21,2} \div \frac{1}{26,5} \text{ соответствует открытым морям.}$$

Следует отметить, что принятые характеристики волн являются экстремальными для данного судна и близкими к максимально возможным для опытового бассейна ОНМУ по условиям высоты волны и эффективности системы волногашения.

Параметры регулярного волнения для модели приведены в таблице 4, а для натурального судна – в таблице 5.

*Таблица 4*

*Параметры регулярного волнения (для модели)*

$\lambda/L$	Длина волны, $\lambda_m$	Частота формы волны, $k_m$	Частота волны, $\sigma_m$	Период волны, $\tau_m$	Частота волнопродуктора, $\sigma_{вп}$	Расчетная высота волны, $h_m$	Радиус волнопродуктора, $r_{вп}$
-	м	1/м	1/с	с	Гц	мм	мм
<b>2,00</b>	2,55	2,47	4,92	1,28	29,00	120,09	175
<b>2,50</b>	3,18	1,97	4,40	1,43	25,90	120,09	175

Таблиця 5

*Параметри регулярного волнення  
(для натурального судна)*

$\lambda/L$	Длина волны, $\lambda_n$	Частота формы волны, $k_n$	Частота волны, $\sigma_n$	Период волны, $\tau_n$	Расчетная высота волны, $h_n$
-	м	1/м	1/с	с	м
<b>2,00</b>	127,3	0,049	0,696	9,03	<b>6,005</b>
<b>2,50</b>	159,1	0,039	0,622	10,10	<b>6,005</b>

Параметры регулярного волнения для натурального судна и для его модели связаны обычными соотношениями между элементами гравитационных волн на глубокой воде и соотношениями подобия.

В таблицах 4 и 5:

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} - \text{частота формы волны;}$$

$$\sigma_i = \sqrt{g k_i} - \text{частота волны;}$$

$$\tau_i = \frac{2\pi}{\sigma_i} - \text{период волны, } i = n, m;$$

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – гравитационная постоянная;

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_m} = \lambda,$$

где  $\lambda = 50$  – масштабный фактор;

$h_\phi = f(\sigma_m, r_{вп}, K_{вп})$  – фактическая высота генерируемой волны,

которая подбирается в процессе подготовки к эксперименту;

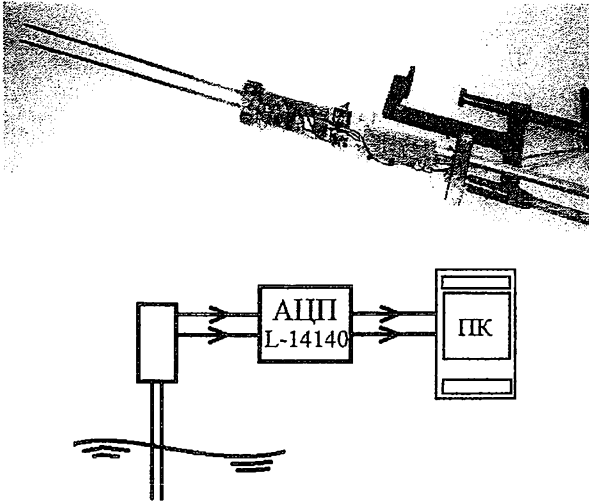
$$|h_\phi - h_m| \leq \varepsilon,$$

где  $\varepsilon = 2 \text{ мм}$  – с учетом особенностей пластинчатого волнопродуктора и неравномерности генерации регулярного волнения;

$K_{вп}$  – коэффициент редуктора волнопродуктора;

$r_{вп}$  – радиус установки коромысла волнопродуктора.

Подбор высоты волны  $h_\phi$  осуществлен с помощью датчика высоты волны струнного типа. Датчик высоты волны является одной из последних разработок сотрудников опытового бассейна ОНМУ и построен на современной элементной базе, что позволяет использовать его без тензометрического усилителя, сократив число подключаемых устройств. Указанный датчик цифрового типа передает сигнал на аналогово-цифровой преобразователь/регистратор LCard L-14140 и далее – на персональный компьютер для формирования файла данных. Общий вид датчика высоты волны и схема измерительной системы приведены на рисунке 8.



*Рис. 8. Общій вид датчика висоти волни  
и схема измерительной системы*

Высоты волн были подобраны при фиксированных характеристиках волнения до начала основных испытаний. При этом датчик волны находился в месте размещения модели в средней части бассейна.

Дополнительный контроль высоты волны осуществлялся также визуально с помощью специальной мерной шкалы, размещенной на борту бассейна (см. рисунки 9, 10 и 11).

**Проведение испытаний.** Положение судна относительно набегающего регулярного волнения характеризуется курсовым углом, который отсчитывается против часовой стрелки от вектора скорости волнения до положительного направления оси  $G_x$  (направленной в нос) системы координат, жестко связанной с судном  $G_{xyz}$ .

Испытания проводились на глубокой воде для расчетной осадки при полной загрузке судна. В каждом опыте модель была закреплена к стенкам бассейна на растяжках под указанными ниже курсовыми углами:

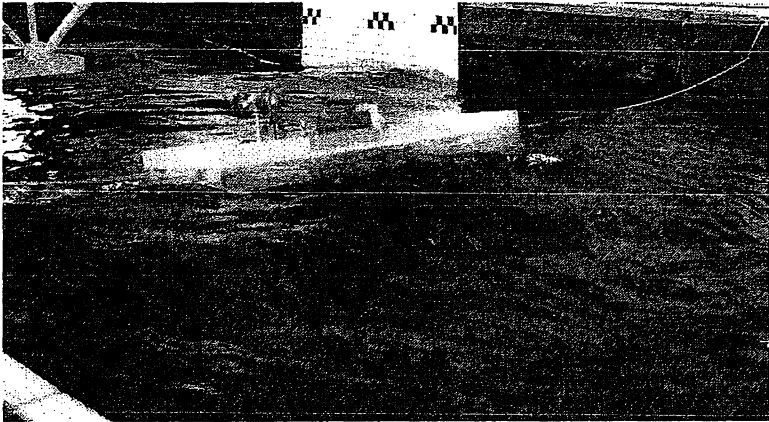
- $90^{\circ}$ ;
- $45^{\circ}$ ;
- $315^{\circ}$ ;
- $225^{\circ}$ ;
- $135^{\circ}$ ;
- $180^{\circ}$ .

Документирование процесса проведения модельных экспериментов выполнено с помощью видеofиксации. Для проведения видеосъемки использована размещенная на штативе цифровая фотокамера Nikon D5100, которая обеспечивает режим записи видео в формате 1920x1080 (full HD).

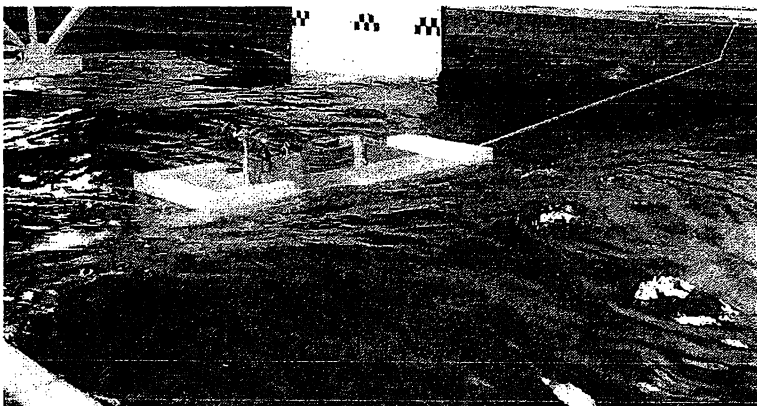
Продолжительность моделирования для натурального объекта, согласно с требованиями [1], определена в 1,0 час, что в пересчете на масштаб модели составляет 8,49 минуты. Время моделирования получено из соотношений подобия для периодов реального и моделируемого волнения.

Оценка количества воды, попавшей в трюм судна, выполнялась после каждого опыта путем измерения её объема с помощью мерного сосуда. Для натурального объекта нормированное согласно с [1] количество жидкости в трюме определяется, исходя из интенсивности заливания – 400 мм/час, умноженной на размеры люкового выреза. Для модели с учетом масштаба критический объем жидкости составил 1,56 л.

Ход испытаний демонстрируют рисунки 9-11, а), б).



а)



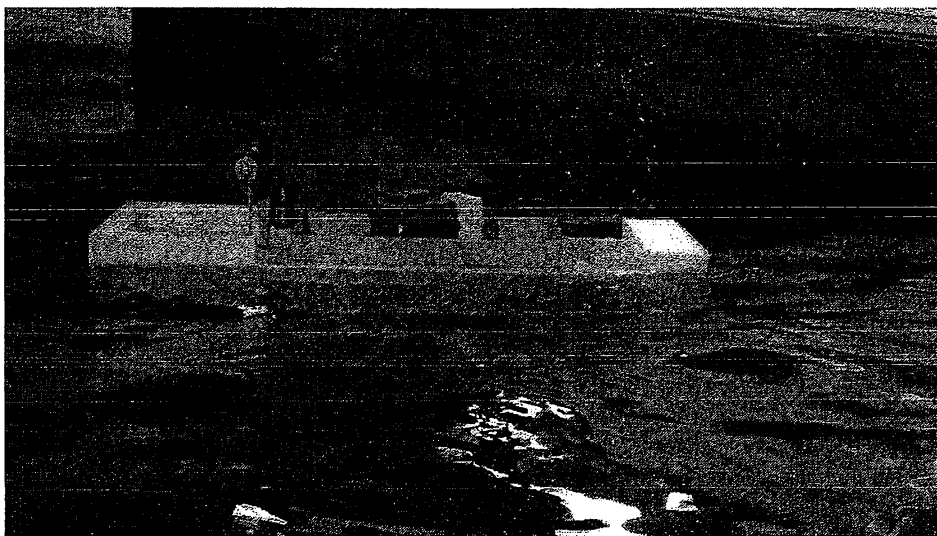
б)

Рис. 9. Судно в полном грузу на регулярном волнении с  $\lambda/L=2,0$ ; крутизна волн  $h=1/21,2$ ; курсовой угол к волнению  $90^0$





a)



б)

*Рис. 10. Судно в полном грузу на регулярном волнении с  $\lambda/L=2,0$ , крутизна волн  $h=1/21,2$ ; курсовой угол к волнению  $45^\circ$*



a)



б)

Рис. 11. Судно в полном грузу на регулярном волнении с  $\lambda/L=2,5$ , крутизна волн  $h=1/25$ ; курсовой угол к волнению  $45^{\circ}$

Наибольший интерес представляет положение судна лагом к волне. В этом положении качка судна наиболее интенсивна (см. рис. 9). Заливание палубы судна в этом положении наблюдалось на всех рассмотренных волнах

По результатам испытаний установлено, что в случае полной загрузки судна качка модели на всех рассматриваемых волнах и курсовых углах не приводила к критическому заливанию открытого грузового помещения. Попадание жидкости в трюм зафиксировано только в одном случае при волне с  $\frac{\lambda}{L} = 2,0$  и курсовом угле  $90^\circ$ . Зафиксированный объем жидкости составил 54 мл при критическом для данной модели объеме в 1,56 л.

**Выводы.** В опытовом бассейне ОНМУ выполнена оценка заливаемости кранового судна проекта CV03.

Результаты проведенного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

- отмечено заливание палубы модели при тупых и острых курсовых углах, при этом волнение воздействует на незащищенные надстройками участки борта;
- на встречном волнении модель испытывает значительную по амплитуде продольную качку;
- при всех рассмотренных сочетаниях волн и курсовых углов качка судна не приводит к критическому заливанию открытого грузового помещения;
- вследствие наличия достаточной высоты борта и комингса грузового трюма даже интенсивное заливание палубы не привело к заливанию трюма. Попадание жидкости в трюм зафиксировано только в одном случае при волне с  $\frac{\lambda}{L} = 2,0$  и курсовом угле  $90^\circ$ .

Выполненная экспериментальная оценка заливаемости подтвердила корректность принятых проектных решений о назначениях высоты надводного борта, высот комингса грузового трюма, баковой и ютовой надстроек, их формы.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *International Maritime Organization: Interim Guidelines for Open-Top Container Ships. MSC/Circ.608/Rev.1. – London, 1994.*
2. *Buchner B., Joaquín Lopez-Cortijo Garcia.: Design aspects of green water loading on FPSOs. – The 22-nd International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Cancun, Mexico. – 8-13 June. – 2003.*
3. *Басин А.М. Качка судов. – М.: Транспорт, 1969. – 272 с.*

4. *Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. – Т. 2 / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – Л.: Судостроение, 1976. – 176 с.*
5. *Lloyd A.R.J.M.: Seakeeping: ship behaviour in rough weather. Ellis Horwood Limited. – England, 1989.*
6. *<https://www.marineinsight.com/future-shipping/eco-ship-2020-a-futuristic-open-hatch-bulk-carrier-concept/>*
7. *Кириллов В.Н., Демидюк А.В., Тонюк В.И. Экспериментальная установка для исследования гидродинамических и кинематических характеристик продольной качки моделей судов // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Одесса, 1998. – № 1. – С. 90-93.*
8. *Демидюк А.В. Модернизация системы измерений опытового бассейна ОНМУ // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Вып. 34. – Одесса, 2012. – С. 67-76.*

*Стаття надійшла до редакції 22.11.2017*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, професор, завідувач кафедри «Машинознавство» Одеського національного морського університету  
**А.В.Конопльов**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету  
**А.В. Гришин**

УДК 621.12.001

Г.В. Егоров, А.Е. Нильва, Д.В. Колесник

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛАСТНЫМИ ВОДАМИ НА НОВЫХ И СУЩЕСТВУЮЩИХ СУДАХ

*В статье описана история создания и основные тезисы Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими (Конвенция BWM-2004), которая требует для новых судов, а через некоторое время и для существующих судов, наличия на борту специального оборудования для обработки/очистки балласта – системы обработки балластных вод (СОБВ). Показаны возможные пути снижения риска переноса вредных водных организмов. Идентифицированы опасности и выполнена оценка для судна при смене балласта в море.*

*Для существующих судов в рамках действующих технических и экономических условий в течении максимум пяти лет вполне возможен для реального применения метод смены балласта в районах с глубиной моря более 2000 м, в открытом море, за пределами 200-мильной прибрежной зоны. Обоснование возможности применения такого метода Морского Инженерное Бюро успешно разработало и применяет для каждого конкретного судна по запросу Заказчика.*

*Затраты по приведению к требованиям BWM-2004 на существующем судне могут быть близки к 500-800 тыс. долларов и выше. Для нового (т.е. построенного относительно недавно) судна «Волго-Дон макс» класса такая СОБВ, в зависимости от производителя, стоит около 210-270 тыс. долларов, а с учетом работ расходы составят до 350 тыс. долларов на судно.*

**Ключевые слова:** Конвенция BWM, существующие и новые суда, проектирование, смена балласта, система обработки балластных вод, экология, риск, перспектива.

*У статті описано історію створення й основні тези Міжнародної конвенції про контроль судових балластових вод і осадів і керування ними (Конвенція BWM-2004), яка вимагає для нових суден, а через якийсь час і для існуючих суден, наявності на борті спеціального устаткування для обробки/очищення баласту – системи обробки балластових вод (СОБВ). Показані можливі шляхи зниження ризику переносу шкідливих водних організмів. Ідентифіковані небезпеки й виконана оцінка для судна при зміні баласту в морі.*

*Для існуючих суден у рамках діючих технічних і економічних умов протягом максимум п'яти років цілком можливий для реального застосування метод зміни баласту в районах із глибиною моря більш 2000 м, у відкритому морі, за межами 200-мильної прибережної зони.*

*Обґрунтування можливості застосування такого методу Морське Інженерне Бюро успішно розробило й застосовує для кожного конкретного судна по запиту Замовника.*

*Витрати по приведенню до вимог BWM-2004 на існуючому судні можуть бути близькі до 500-800 тис. доларів і вище. Для нового (тобто побудованого відносно недавно) судна «Волго-Дон макс» класу така СОБВ, залежно від виробника, коштує близько 210-270 тис. доларів, а з урахуванням робіт витрати складуть до 350 тис. доларів на судно.*

**Ключові слова:** Конвенція BWM, існуючі та нові судна, проектування, зміна баласту, система обробки баластових вод, екологія, ризик, перспектива.

*In paper history of creation and main theses of The International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM Convention) which requires for new vessels and after a while for existing vessels, onboard availability of special equipment for treatment of ballast – ballast water treatment system (BWTS) are described. Possible ways of decrease in risk of transfer of harmful aquatic organisms are shown. Dangers are identified and the assessment for the vessel at change of ballast in the sea is executed.*

*For existing vessels within the current operating technical and economic conditions of at most five years the method of change of ballast in areas with depth of water more than 2000 m, in the open sea, outside 200-mile near-shore area is quite possible for real application. Marine Engineering Bureau has successfully developed grounding of possibility of application of such method and applies to each specific vessel at the request of the Customer.*

*Expenses on modernization to requirements of BWM-2004 on existing vessel can make up to 500-800 thousand dollars and above. For new (i.e. constructed relative recently) «Volga-Don max» class vessels such BWTS, depending on supplier, costs about 210-270 thousand dollars, and taking into account works expenses will make up to 350 thousand dollars on the vessel.*

**Keywords:** BWM Convention, existing and new vessels, design, ballast changing, ballast water treatment system, ecology, risk, perspective.

**Постановка проблеми.** Человечество накопило значительный негативный опыт, связанный с непреднамеренным распространением различного рода вредных и опасных организмов. Источниками такого переноса часто служили средства транспорта, перемещаемые грузы, часто сами люди. При этом организмы, которые вполне вписывались в прежнюю биосистему, где они находились до переноса, могли в новых условиях быть опасными для организмов новой биосистемы.

Интересно отметить, что, как правило, человек обращал внимание на такие изменения в окружающем его мире в случаях, когда это касалось его непосредственных жизненных интересов, будь то промысел, сельское хозяйство, промышленная деятельность и т.п.

Морской транспорт не является исключением. Суда перевозят значительное количество грузов, людей, а также перемещаются сами, тем самым, представляя возможность перемещения некоторым видам вредных водных организмов (ВВО), бактерий и вирусов заболеваний.

Традиционно государственные органы санитарно-эпидемиологического надзора вели контроль за грузами и людьми, перемещавшимися с помощью морского транспорта. Проводились специальные мероприятия, например, фумигация зерновых грузов и т.п., которые позволили существенно снизить риск переноса вредных организмов.

Средой для несанкционированного переноса ВВО является водяной балласт (ВБ), который суда принимают для обеспечения безопасной эксплуатации, находясь, как правило, без груза, порожнем для обеспечения приемлемой мореходности и прочности; с грузом в процессе рейса, для компенсации расходования запасов; с палубным грузом и со смещаемым навалочным грузом для обеспечения остойчивости; с легким грузом для обеспечения приемлемой мореходности и прочности; в иных ситуациях, в зависимости от архитектурно-конструктивного типа судна и перевозимого груза.

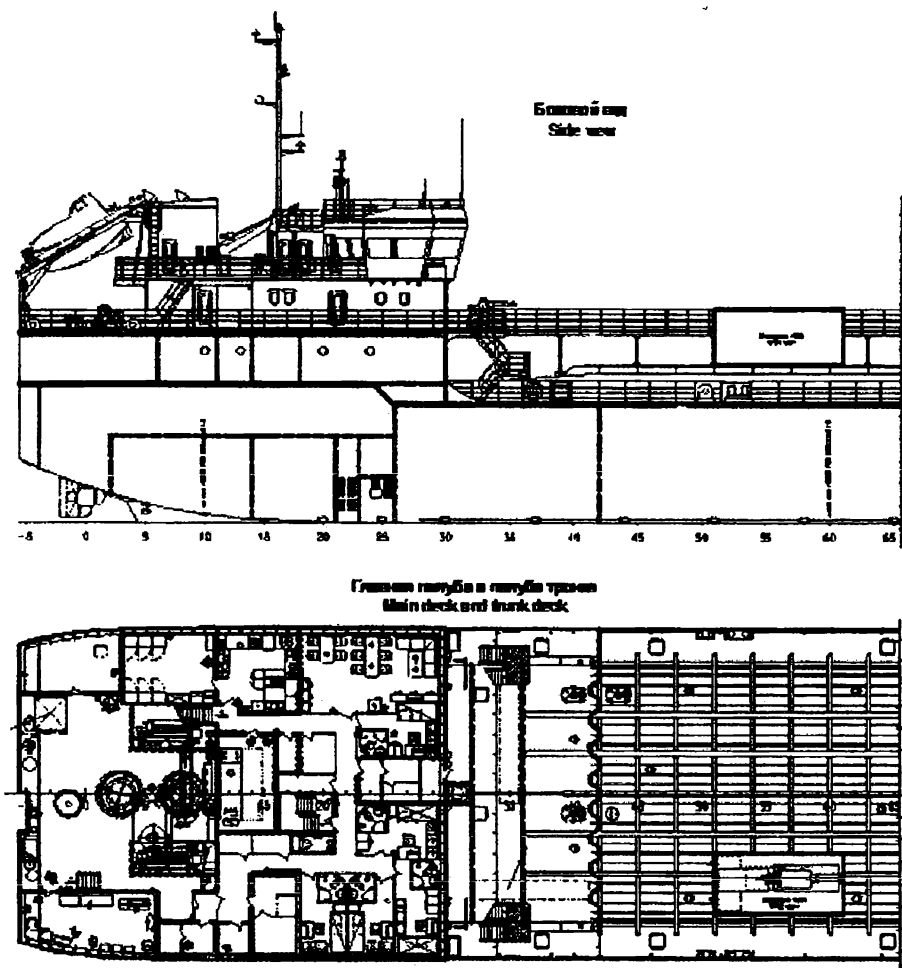
Для того, чтобы представить масштаб вопроса, можно привести пример порта Новороссийск, где только за один 2016 год было сброшено более 50 млн. тонн водяного балласта [7].

Принятый в начале или в процессе рейса ВБ по завершению рейса сбрасывался в прибрежной зоне, на рейде, в портах, в судоходных реках. Вместе с ВБ в указанные водные районы попадали чужеродные водные организмы. Ущерб от попадания ВВО был самый различный: подрыв запасов промысловых водных организмов; распространение возбудителей эпидемий и эпизоотий; токсичное цветение воды; обрастание и биокоррозия гидротехнических и водозаборных сооружений. По некоторым данным всего за последних два десятилетия было отмечено более 70 опасных по своим последствиям случаев переноса ВВО [7-11; 13; 14].

Для предотвращения таких проблем была принята специальная Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года (Конвенция BWM 2004), которая требует для новых судов (а через некоторое время и для существующих судов) наличия на борту специального оборудования для обработки (очистки) балласта – системы обработки балластных вод или СОБВ.

Первыми отечественными судами с СОБВ на борту будут танкеры проектов RST27, RST27M и RST25, а также сухогрузы проектов RSD49 и RSD59.

На танкере-химовозе проекта RST27 такое оборудование будет установлено в контейнере на палубе тронка (см. рисунки 1 и 2), а на сухогрузах – в машинном отделении.



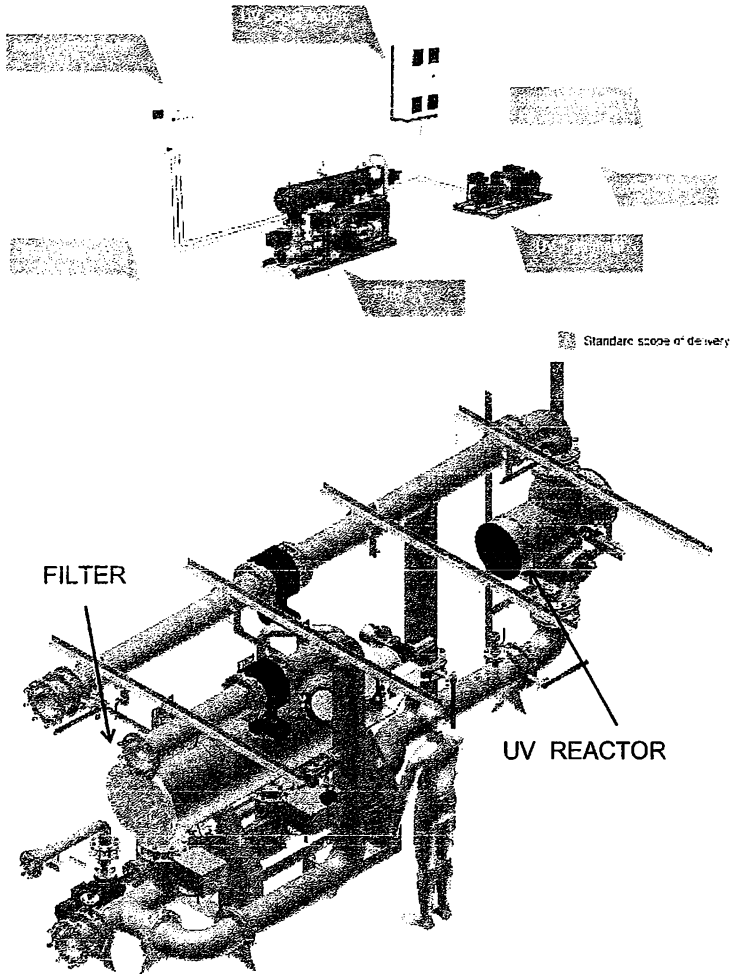
*Рис. 1. Розположення обладнання СОВВ  
на танкері-химовозе проекту RST27*

Возможные пути снижения риска переноса ВВО. В 1973 году Международная конференция по предотвращению загрязнения моря предложила провести исследования ВБ как среды распространения ВВО.

В 1989 году Канада ввела требования по смене ВБ перед входом в Великие озера и реку Святого Лаврентия. В этом же году были установлены правила смены ВБ в водах Черного моря при следовании в порты Одесса, Николаев и Херсон.

В 1990 году в США приняли закон о предотвращении ущерба, вызванного водными организмами неместного происхождения. Введены требования по смене ВБ в открытом океане для судов, следующих в Великие Озера и вверх по реке Гудзон, создана комиссия по оценке ущерба от водных организмов.





*Рис. 2. Внешний вид оборудования СОБВ,  
устанавливаемый на танкере-химовозе проекта RST27*

В 1990 году Комитет ИМО по защите окружающей среды образовал рабочую группу по проблемам ВВ. В результате таких исследований, касавшихся биологических и санитарно-эпидемиологических проблем, в 1991 году ИМО приняла резолюцию МЕРС.50(31). В 1993 году откорректировала и переиздала ее в виде резолюции А.774(18) «Руководство по предотвращению внесения нежелательных водных и патогенных организмов в результате сброса с судов водяного балласта и осадков». В 1997 году указанный документ был обновлен и принят в виде резолюции А.868(20) «Руководство по контролю и управлению балластными операциями на судах в целях сведения к минимуму переноса вредных водных организмов и патогенов».

В марте 2000 года Комитет ИМО по защите окружающей среды принял предварительное решение о необходимости самостоятельной конвенции по регламентации ВБ («Ballast Water Management Code»).

Глобальный Экономический фонд, Программа ООН по развитию и ИМО разработали специальную научно-практическую программу «Снятие барьеров на пути эффективной реализации мер по контролю водяного балласта и управлению им» (Программа ГЛО-Балласт) [13]. Ряд стран (Бразилия, Китай, Индия, Иран, ЮАР, Украина) были определены в качестве центров для отработки правовых, организационных и технических проблем, возникающих при контроле за ВБ.

Цель резолюции А.868(20) состояла в создании международной системы организационных мероприятий, уменьшающих вероятность переноса бактерий, растений и животных в балласте и осадках существующими судами.

Австралия в 1992 году ввела правила о выполнении рекомендуемых требований по обработке ВБ. В 1994 году Израиль установил требования по смене ВБ в открытом океане вне пределов Средиземного или Красного морей. Чили в 1995 году ввела требования по смене ВБ судов, заходящих в чилийские порты.

В 1996 году США ввели требования для нефтяных танкеров, вывозящих экспортную нефть из портов Аляски за пределы США с условием смены ВБ на обратном переходе. Конгресс США принял национальный акт о вредных организмах (National Invasive Species Act – NISA), которым подтвердил требования закона 1990 года и распространил требования в отношении балласта на все воды США и режим обязательной смены ВБ. В 1999 году на основании закона NISA-96. вступили в силу временные требования Береговой Охраны США.

В 2001 году Черноморская комиссия разработала региональный план действия для сведения к минимуму переноса вредных водных и патогенных организмов в ВБ судов.

В итоге, ООН в 2004 году приняла специальную Международную конвенцию о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года (Конвенция BWM 2004).

**Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими.** Российская Федерация является стороной конвенции BWM-2004, подписавшей Конвенцию 24 мая 2012 года.

Все суда валовой вместимостью 400 и более, вне зависимости от их даты постройки и типа, которые имеют право плавания под флагом Стороны, подписавшей Конвенцию должны быть освидетельствованы на соответствие Конвенции BWM.

В отношении судов государств, не являющихся Сторонами BWM-2004, требования BWM-2004 будут применять, дабы не создавать для этих флагов преимуществ по сравнению с судами стран-подписантов.

Понятно, что наиболее эффективным методом биологической защиты является отсутствие самого ВБ на борту судна или хотя бы необходимости сброса ВБ перед приемом груза. Однако технически реализовать такую схему на действующих судах крайне сложно (для поддержания безопасных характеристик мореходности, прочности и остойчивости суда во время порожних переходов вынуждены принимать значительное количество жидкого балласта, до 50 % от дедвейта).

Требования BWM-2004 распространяются на все суда валовой вместимостью 400 и более, вне зависимости от их даты постройки и типа, которые имеют право плавания под флагом Стороны, подписавшей Конвенцию.

В соответствии со Статьей 3 BWM-2004 требования не применяются к следующим судам:

1. Корабли и суда вспомогательного флота ВМФ, а также другие государственные суда, принадлежащие государству или эксплуатируемые им и используемые в данное время только для правительственной некоммерческой службы.

2. Суда Стороны, которые эксплуатируются только в водах, находящихся под юрисдикцией этой Стороны. Пример – суда с флагом РФ, работающие на перевалку в районе порта Кавказ. Однако если такой рейс совершать будет судно, с флагом, отличным от РФ, то требования распространяются.

3. Суда, спроектированные так, что им прием балласта не нужен.

4. Суда, перевозящие в закрытых танках постоянные балластные воды, которые не подлежат сбросу (некий аналог твердого балласта).

5. Суда, которые сбрасывают балластные воды в специальные приемные сооружения (например, в порту или на другое специально оборудованное судно – сборщик и обработчик балластных вод). Например, можно применить в качестве судов – сборщиков «однокорпусные» танкера, дооборудовав их системами обработки балластных вод.

Предусмотрено два стандарта управления балластными водами: D-1 и D-2:

1. **Стандарт D-1** предполагает возможность смены балласта в открытом море, не ближе 50 морских миль от берега, где глубина не менее 200 метров. Суда должны производить либо замену балластных вод с эффективностью, составляющей 95 % от их объема либо прокачку трехкратного объема каждого балластного танка.

Такая замена балласта в море (или прокачка) должны осуществляться в соответствии с одобренным классом специальным Планом управления балластными водами (см. пример на рисунке 3, разрабатываются в соответствии с Руководством Р4 ИМО МЕРС.127(53) и фиксироваться в специальном Журнале операций с балластными водами (см. рисунки 4 и 5). Журнал хранится на судне в течение двух лет после внесения в него последней записи, а после этого – под контролем компании в течение не менее трех лет.

2. Стандарт D-2 требует наличия на борту специального оборудования для обработки (очистки) балласта – системы обработки балластных вод или СОБВ. В нем устанавливается минимальное количество живых организмов, которые могут содержаться в балластной воде, подвергнутой обработке с помощью этой специальной системы.

Суда, киль которых заложен 8 сентября 2017, или после этой даты, должны быть построены уже имея на борту СОБВ.

Остальным судам дан переходный период – они должны быть дооборудованы СОБВ к первому после 8 сентября 2019 года очередному освидетельствованию. До этого они должны отвечать стандарту D-1, т.е. им разрешено балласт менять в море. Например, Российский морской регистр судоходства готов обеспечить освидетельствование судов с его классом до 8 сентября 2019 года, что позволит существующему флоту отработать еще пять лет от даты этого освидетельствования без установки СОБВ.

Затраты по приведению к требованиям WWM-2004 на судне смешанного река-море плавания постройки 1960-80 годов могут быть близки к 500-800 тыс. долларов и выше.

Таким образом, методы обработки ВБ и сдачи ВБ в портах в состоянии решить поставленную задачу, но стоимость подобных мероприятий высока.

Поэтому для существующих судов в рамках действующих технических и экономических условий в течение максимум пяти лет вполне возможен для реального применения метод смены балласта в районах с глубиной моря более 2000 м, в открытом море, за пределами 200-мильной прибрежной зоны.

**Идентификация опасностей для судна при смене балласта в море.** Все действующие нормативные документы запрещают прием балласта в море, если это не подтверждено специальными расчетами. Действующие на судах эксплуатационные документы запрещают прием-откатку ВБ в море.

Однако только специально оговоренные цистерны (как правило, это достаточно узкие цистерны, с малой свободной поверхностью) разрешается заполнять или освобождать в море для достижения нормальной посадки судна, при этом их влияние на остойчивость обязательно проверяется расчетом.

Обычно считается, что проблема смены балласта в море возникает только при переходах судов без груза, порожнем. Однако подобные представления исходят из модели кругового рейса, когда рейс с грузом однозначно сменяется (чередуется) с рейсом без груза. В действительности, все обстоит не так однозначно, т.к. оптимальным совершенно справедливо считают менеджмент, обеспечивающий «обратную» загрузку.

Инструкция по безопасности смене балласта в море  
/ Ship with 60 TEU 61

4.2.4 Судно с 60 контейнерами 6Т  
/ Ship with 60 TEU 6T

Рекомендованный порядок смены балласта  
/ Ship with 60 TEU 6T

Асфальт AP	Балластные ящики						Формат FP
	1	2	3	4	5	6	
	1	2	3	4	5	6	
СТАП 1. Отгрузка балласта из отсеков 35, 37, форштевень							
СТАП 2. Приемка балласта в отсеки 35, 37, форштевень							
СТАП 3. Приемка балласта в отсеки 35, 37, форштевень							
СТАП 4. Приемка балласта в отсеки 35, 37, форштевень							
СТАП 5. Приемка балласта в отсеки 35, 37, форштевень							
СТАП 6. Приемка балласта в отсеки 35, 37, форштевень							

Обозначения / Designations:  
 - полный ящик (6Т сменной балласта) / full tank (6T swap ballast exchange)  
 - пустой ящик / empty tank  
 - полный ящик (используемый сменной балласта) / full tank (used swap ballast exchange)

635.1 - ЛМГПТ - 001

57

Инструкция по безопасности смене балласта в море  
/ Ship with 60 TEU 6T

Классификация морских контейнерных перевозочных средств по классификации Судна

Параметры Items	Минимум Minimum						Максимум Maximum					
	СТАП 1 STEP 1	СТАП 2 STEP 2	СТАП 3 STEP 3	СТАП 4 STEP 4	СТАП 5 STEP 5	СТАП 6 STEP 6	СТАП 1 STEP 1	СТАП 2 STEP 2	СТАП 3 STEP 3	СТАП 4 STEP 4	СТАП 5 STEP 5	СТАП 6 STEP 6
Средняя скорость Average speed	m	d	4.11	3.73	4.11	3.88	4.11	3.96	4.11	3.96	4.11	3.96
Средняя высота Average height	m	d	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Средняя ширина Average width	m	d	5.22	5.47	5.22	5.66	5.22	5.21	5.22	5.22	5.22	5.22
Средняя глубина Average depth	m	d	-2.22	-3.48	-2.22	-3.61	-2.22	-2.62	-2.22	-2.62	-2.22	-2.62
Средняя температура Average temperature	m	d	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36
Средняя влажность Average humidity	%	d	61%	61%	61%	61%	61%	61%	61%	61%	61%	61%
Средняя скорость ветра Average wind speed	m/s	d	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Средняя температура воды Average water temperature	°C	d	19%	-19%	-19%	-19%	-19%	-19%	-19%	-19%	-19%	-19%
Средняя температура воздуха Average air temperature	°C	d	-22.6	-22.6	-22.6	-22.6	-22.6	-22.6	-22.6	-22.6	-22.6	-22.6
Средняя температура воды Average water temperature	°C	d	1000	903	1000	747	1000	640	1000	640	1000	640

1) Форма ящика балласта должна соответствовать требованиям к форме балласта по определению  
 2) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 3) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 4) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 5) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 6) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 7) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 8) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 9) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между  
 10) Максимальная температура ЛТ должна соответствовать (максимальная) температуре 0.07 при неограниченной разнице между

THE WATER BALLAST EXCHANGE OPERATION IN THE TANKS 35, 37 (STEPS 1, 2, 3, 4) FOR THE SHIP WITH 60 TEU 6T SHOULD BE LIMITED BY SEA STATE WITH A 3% PROBABILITY WAVE HEIGHT NOT MORE THAN 6.0 M.  
 THE WATER BALLAST EXCHANGE OPERATION IN THE TANKS 35, 37 (STEPS 4, 5, 6) FOR THE SHIP WITH 60 TEU 6T SHOULD BE LIMITED BY SEA STATE WITH A 3% PROBABILITY WAVE HEIGHT NOT MORE THAN 4.0 M.  
 The maximum allowable ISB stability percentage is limited to 1.1 SP value.

635.1 - ЛМГПТ - 001

38

Рис. 3. Пример изменения посадки, устойчивости и прочности при смене балласта для конкретного судна при типовом варианте загрузки палубным грузом

Является ли данное сообщение корректировкой ранее отправленного?  ДА  НЕТ

**3. ПРИНЯТЫЙ БАЛЛАСТ И ОБЪЕМЫ ТАНКОВ**  
Используемые далее единицы (м<sup>3</sup>, МТ, LT, ST)

Всего балластной воды на борту		Объем	Ед.	Кол-во танков с балластом
Страна предыдущего порта:		Объем	м <sup>3</sup>	
Страна следующего порта:		Объем	Ед.	Общие кол-во танков
			м <sup>3</sup>	

**4. ОПЕРАЦИИ С БАЛЛАСТНОЙ ВОДОЙ** Количество танков ВБ под выгрузку:

Из танков под выгрузку, как много:  С замененным балластом:

Обработанных альтернативным способом:

Укажите альтернативный способ (если был):

Если обработка балласта не производилась, укажите причину:

План управления балластом имеется?  ДА  НЕТ  План управления балластом выполняется?  ДА  НЕТ

Руководство IMO по контролю воднотр. балласта на судне (Резолюция А.888(20))?  ДА  НЕТ

Если нет, см. п. № 6

**5. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВБ: РАКТИФИКАЦИЯ ВСЕХ ТАНКОВ ПОДЛЕЖАЩИХ ДЕБАЛЛАСТИРОВКЕ В ПОРТУ ПРИБЫТИЯ; ОПЕРАЦИИ С ВБ**

Танки (по номеру в списке судна)	ИСТОЧНИК ВБ		ОПЕРАЦИИ С ВБ				Свойства (вд. м <sup>3</sup> )						
	ПОРТ или широта / долгота	ОБЪЕМ (вд. м <sup>3</sup> )	Темп (градусы)	Дата дробь/мгт	Большая часть широта / долгота	% Зап.		Метод (ER / FT / ALD)	Гру-бная (вд)	ПОРТ или широта / долгота	Дата дробь/мгт	ПОРТ или широта / долгота	ОБЪЕМ (вд. м <sup>3</sup> )
		м <sup>3</sup>	C				ER					м <sup>3</sup>	56
		м <sup>3</sup>	C				ER					м <sup>3</sup>	56
		м <sup>3</sup>	C				ER					м <sup>3</sup>	56
		м <sup>3</sup>	C				ER					м <sup>3</sup>	56
		м <sup>3</sup>	C				ER					м <sup>3</sup>	56
		м <sup>3</sup>	C				ER					м <sup>3</sup>	56
		м <sup>3</sup>	C				ER					м <sup>3</sup>	56

Коды балластных танков: Фортик = FP, Актерик = AP, Двоборное дно = DB, Бортовое = BT, Подполубочье = TB, Прямые траверзы = SM, Индекс O

Коды метода заправки балласта: Последовательный = ER, Протоочный = FT, Альтернативный = ALD.

6. ФАМИЛИЯ ОТВЕТСТВЕННОГО ДОЛЖНОСТНОГО ЛИЦА, ДОЛЖНОСТЬ И ПОДПИСЬ

Рис. 3. Форма сообщения о водянном балласте



Проведенный проф. Г.В. Егоровым анализ мореходно-прочностных характеристик существующих судов во время смены балласта показал, что любые подобные изменения нагрузки судна в море представляют реальную опасность и требуют всестороннего изучения. Работа выполнялась с использованием метода формализованной оценки безопасности [1-6].

Были выполнены исследования по размещению балласта с соответствующими этому размещению параметрами посадки, устойчивости и общей прочности 50 типовых проектов судов (см. таблицу 1) из числа поднадзорных РС различных типов и различных районов плавания. Среди них были: сухогрузы ограниченных районов плавания (с классами от М-СП 2,5 Речного Регистра до района R1 РС) – 21; сухогрузы неограниченного района плавания (в том числе твиндечные суда традиционных типов, лесовозы, многоцелевые однопалубные суда и др.) – 8; навалочные суда – 8; наливные суда ограниченных районов плавания (с классами от М-СП 2,5 до R1) – 4; наливные суда неограниченного района плавания – 3; нефтерудовозы и нефтенавалочники – 2; накатные и грузопассажирские суда – 3.

Суда рассматривались в различных состояниях, когда необходим прием балласта: порожний рейс; при полном использовании грузоподъемности (в грузу); с однородным несмещаемым генеральным или навалочным грузом (если применимо); с однородным смещаемым навалочным или зерновым грузом (если применимо); с палубным грузом (если применимо).

Следует отметить, что ограничения по посадке как причина приема ВБ действуют для практически всех поднадзорных РС судов. Однако тяжесть последствий при их временном невыполнении не столь велика, как ограничений по устойчивости и общей продольной прочности.

Для состояния без груза ограничение по общей продольной прочности является определяющим: для 8 из 21 рассмотренного сухогрузного судна ограниченного района плавания (для классов не выше R2-RSN); для 2 из 8 рассмотренных сухогрузных судов неограниченного района плавания; для 8 рассмотренных навалочных судов неограниченного района плавания; для 4 рассмотренных наливных судов ограниченного района плавания; для 3 рассмотренных наливных судов неограниченного района плавания; для 2 рассмотренных комбинированных судов.

Для многих судов, состояние в балласте определяет требования к прочности (например, сухогрузы смешанного плавания), некоторые суда в состоянии порожнем имеют отрицательную метацентрическую высоту (что не противоречит действующим правилам постройки классификационных обществ).



Таблиця 1  
Сводные данные по параметрам и ограничениям балластировки.

Проект	Тип	Район плавания	Δ по ЛГВЛ, т	Состояние загрузки		Р балласта, т.		P/D, %		Ограничения			
				Балласт	Генгруз	Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Остойчивость	Прочность	Посадка	
1565	Сухогруз	M-CP 2.5	5385	Балласт	3199	3199	59,4	59,4			+	+	
				Генгруз	58	787	1,1	14,6					+
				Смещ. Груз	50	130	0,9	2,4					+
Д080МК	Сухогруз	R3-RSN	3478	Балласт	1592	1660	45,8	47,7			+	+	
				Груз	67	1592	1,9	45,8			+		+
				Балласт	1704	1704	35,8	35,8					+
2-95A/R	Сухогруз	R3-RSN	4761	Несм. Груз	149	149	3,1	3,1				+	
				Смещ. Груз	57	379	1,2	8,0			+		+
				Балласт	3157	3321	50,6	53,2					+
05074М модернизированный	Сухогруз	R3-RSN	6238	Несм. Груз	124	164	2,0	2,6				+	
				Смещ. груз	124	124	2,0	2,0					+
				Балласт	715	715	25,7	25,7					+
191	Сухогруз	R2-RSN	2784	Несм. Груз	34	34	1,2	1,2				+	
				Смещ. Груз	34	34							+
				Палубн. груз	34	714	1,2	25,6			+		+
781	Сухогруз	R2-RSN	3846	Балласт	1270	1270	33,0	33,0				+	
				Несм. Груз	154	175	4,0	4,6					+
				Смещ. Груз	70	250					+		+
1557	Сухогруз	R2-RSN	4624	Палубн. груз	220	220	5,7	5,7				+	
				Балласт	1688	1688	36,5	36,5					+
				Генгруз	58	58	1,3	1,3					+
92-13/040	Сухогруз	R2-RSN	5205	Смещ. груз	59	154	1,3	3,3				+	
				Балласт	1797	1947	34,5	37,4			+		+
				Несм. груз	27	214	0,5	4,1					+
				Смещ. груз	10	385					+		
				Палубн. груз	588	1756	11,3	33,7			+	+	

Продолжение табл. 1

Проект	Тип	Район плавания	Δ по ЛГВД, т	Состояние загрузки	Р балласта, т.		P/D, %		Ограничения		
					Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Остойчивость	Прочность	Посадка
488AM	Сухогруз	R2-RSN	5574	Балласт	1900	1900	34,1	34,1			+
				Несм. груз	88	597	1,6	10,7			+
				Смещ. груз	88	88					+
0225	Сухогруз	R2-RSN	6504	Палубн. груз	33	1931	0,6	34,6		+	+
				Балласт	2253	2253	34,6	34,6			+
				Несм. груз	506	506	7,8	7,8			+
				Смещ. Груз	60	60					+
				Палубн. груз	200	2253	3,1	34,6		+	+
326.1	Сухогруз	R2-RSN	2287	Балласт	951	951	41,6	41,6			+
				Несм. груз	49	437	2,1	19,1			+
				Смещ. груз	40	333					+
				Палубн. груз	177	774	7,7	33,8		+	+
289	Сухогруз	R2	3150	Балласт	895	895	28,4	28,4			+
				Несм. груз	58	282	1,8	9,0			+
				Смещ. груз	58	131					+
				Палубн. груз	75	896	2,4	28,4		+	+
1743.1	Сухогруз	R2-RSN	4375	Балласт	1316	1316	30,1	30,1			+
				Несм. груз	104	104	2,4	2,4			+
				Смещ. груз	63	250					+
				Палубн. груз	104	1669	2,4	38,1		+	+
05074A	Сухогруз	R2-RSN	6010	Балласт	1949	1949	32,4	32,4			+
				Несм. Груз	45	110	0,7	1,8			+
				Смещ. Груз	20	165					+
				Палубн. груз	135	1949	2,2	32,4		+	+
1756	Сухогруз	R1	2913	Балласт	215	215	7,4	7,4			+
				Несм. груз	199	357	6,8	12,3			+
				Палубн. груз	199	484	6,8	16,6		+	+

Продолжение табл. 1

Проект	Тип	Район плавания	Δ по ЛПВЛ, т	Состояние загрузки	Р балласта, т.		P/D, %		Ограничения		
					Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Остойчивость	Прочность	Посадка
92-063	Сухогруз	R1	4914	Балласт	1622	1627	33,0	33,1			+
				Несм. груз	142	404	2,9	8,2		+	+
				Смеш. груз	575	857					+
16510	Сухогруз	R1	6038	Палубн. груз	864	1622	17,6	33,0		+	+
				Балласт	1588	1588	26,3	26,3			+
				Несм. груз	75	400	1,2	6,6			+
205	Сухогруз	R1	6261	Смеш. груз	75	400					+
				Палубн. груз	282	1261	4,7	20,9		+	+
				Балласт	2081	2294	33,2	36,6			+
1572	Сухогруз	R1	6752	Несм. груз	0	0	0,0	0,0			
				Смеш. груз	0	0					
				Палубн. груз	231	231	3,7	3,7		+	
19610	Сухогруз	R1	8917	Балласт	2093	2093	31,0	31,0			+
				Несм. груз	67	497	1,0	7,4			+
				Смеш. груз	37	601					+
740	Сухогруз	Неогр.	4388	Палубн. груз	227	227	3,4	3,4			+
				Балласт	2107	2107	23,6	23,6			+
				Несм. груз	40	152	0,4	1,7			+
3250AT	Сухогруз	Неогр.	4453	Смеш. груз	133	133					+
				Палубн. груз	133	2241	1,5	25,1		+	+
				Балласт	583	583	13,3	13,3			+
3250AT	Сухогруз	Неогр.	4453	Несм. груз	93	245	2,1	5,6			+
				Смеш. груз	422	480				+	+
				Палубн. груз	93	583	2,1	13,3		+	+
3250AT	Сухогруз	Неогр.	4453	Балласт	832	832	18,7	18,7			+
				Несм. груз	1	186	0,0	4,2			+
				Смеш. груз	186	369				+	+
3250AT	Сухогруз	Неогр.	4453	Палубн. груз	186	688	4,2	15,5			+
				Балласт	186	688	4,2	15,5			+

Продолжение табл. 1

Проект	Тип	Район плавания	Δ по ЛГВЛ, т	Состояние загрузки	Р Балласта, т.		P/D, %		Ограничения				
					Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Остойчивость	Прочность	Посадка		
P009	Сухогруз	Неогр.	6623	Балласт	1793	1793	27,1	27,1			+	+	
				Несм. груз	80	243	1,2	3,7					+
				Смещ. груз	80	243							
15881	Сухогруз	Неогр.	8876	Палубн. груз	151	1583	2,3	23,9		+		+	
				Балласт	1996	2105	22,5	23,7					+
				Несм. груз	276	608	3,1	6,8					+
138N	Сухогруз	Неогр.	9313	Смещ. груз	109	276						+	
				Палубн. груз	1053	2272	11,9	25,6		+			+
				Балласт	1714	1719	18,4	18,5				+	+
1586	Сухогруз	Неогр.	12170	Несм. груз	338	343	3,6	3,7				+	
				Смещ. груз	338	614					+		+
				Палубн. груз	649	2060	7,0	22,1					+
1585	Сухогруз	Неогр.	22802	Балласт	1511	1641	12,4	13,5				+	
				Несм. груз	208	978	1,7	8,0			+		+
				Смещ. груз	598	1241					+		+
BD5611	Балкер	Неогр.	33460	Палубн. груз	1677	1783	13,8	14,7				+	
				Балласт	2270	2270	10,0	10,0					+
				Несм. груз	15	1677	0,1	7,4			+		+
584.1	Балкер	Неогр.	31860	Смещ. груз	15	1346						+	
				Палубн. груз	1926	1926	8,4	8,4					+
				Балласт	7623	12576	22,8	37,6					+
584.1	Балкер	Неогр.	31860	Несм. груз	1589	1589	4,7	4,7				+	
				Смещ. груз	694	694							+
				Палубн. груз	3000	4249	9,0	12,7			+		+
584.1	Балкер	Неогр.	31860	Балласт	8605	12576	27,0	39,5				+	
				Несм. груз	0	0	0,0	0,0					+
				Смещ. груз	1395	1395	4,4	4,4					+

Продолжение табл. 1

Проект	Тип	Район плавания	Δ по ЛГВЛ, т	Состояние загрузки	P балласта, т.		P/D, %		Ограничения		
					Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Остойчивость	Прочность	Посадка
584E	Балкер	Неогр.	31980	Балласт	7432	12101	23,2	37,8		+	+
				Несм. груз	5313	8139	16,6	25,5			+
				Смещ. груз	983	1417	3,1	4,4			+
B470	Балкер	Неогр.	33310	Балласт	8715	9979	26,2	30,0		+	+
				Несм. груз	60	2981	0,2	8,9		+	+
				Смещ. груз	156	717	0,5	2,2		+	+
BN1160	Балкер	Неогр.	34459	Балласт	8260	9184	24,0	26,7		+	+
				Несм. груз	210	1224	0,6	3,6		+	+
				Смещ. груз	210	210	0,6	0,6			+
86K	Балкер	Неогр.	34479	Балласт	8576	13511	24,9	39,2		+	+
				Несм. груз	2352	2352	6,8	6,8		+	+
				Смещ. груз	1064	1175				+	+
VJN426	Балкер	Неогр.	36071	Палубн. груз	3182	4400	9,2	12,8			+
				Балласт	11149	11149	30,9	30,9		+	+
				Несм. груз	1525	1525	4,2	4,2			+
1573	Балкер	Неогр.	47775	Смещ. груз	1563	3316				+	+
				Палубн. груз	3569	4679	9,9	13,0		+	+
				Балласт	11760	17780	24,6	37,2		+	+
15941	Балкер	Неогр.	66000	Несм. груз	2105	2105	4,4	4,4			+
				Смещ. груз	2105	2105	4,4	4,4			+
				Балласт	18544	29864	28,1	45,2		+	+
P77	Танкер	R3-RSN	3840	Несм. груз	1224	3852	1,9	5,8			+
				Смещ. груз	1272	1398	33,1	36,4		+	+
				Груз	31	31	0,8	0,8			+
621	Танкер	R3-RSN	5393	Балласт	1809	1809	33,5	33,5		+	+
				Груз	20	1069	0,4	19,8		+	+

Продолжение табл. 1

Проект	Тип	Район плавания	Δ по ЛПВЛ, т	Состояние загрузки	R балласта, т.		P/D, %		Ограничения				
					Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Остойчивость	Прочность	Посадка		
550/1577	Танкер	R2-RSN	6502	Балласт	2915	2915	44,8	44,8			+	+	
				Несм. груз	206	206	3,2	3,2					+
1677M	Танкер	R1	8837	Балласт	2669	2802	30,2	31,7			+	+	
				Груз	133	184	1,5	2,1					+
2226A	Танкер	Неогр.	22951	Балласт	6434	10800	28,0	47,1		+	+	+	
				Груз	20	2864	0,1	12,5					+
Ашхабад	Танкер	Неогр.	31000	Балласт	9486	9486	30,6	30,6			+	+	
				Груз	0	0	0,0	0,0					
309	Танкер	Неогр.	104211	Балласт	33390	50719	32,0	48,7		+	+	+	
				Груз	5000	31662	4,8	30,4					+
1570	Нефтерудовоз	R2-RSN	4854	Балласт	1370	1370	28,2	28,2			+	+	
				Несм. груз	136	544	2,8	11,2					+
				Смеш. груз	280	544							+
				Наливной	24	332	0,5	6,8					+
B527	Нефте-навалочник	Неогр.	139965	Балласт	8605	12576	6,1	9,0			+	+	
				Несм. груз	0	0	0,0	0,0					
161	Ро-ро	R1	8955	Смеш. груз	1395	1395	1,0	1,0				+	
				Балласт	1136	1485	12,7	16,6		+			+
Каледония	Грузо-пасс.	Неогр.	2089	Груз	152	815	1,7	9,1		+	+	+	
				Палубн. груз	170	1513	1,9	16,9		+			+
Мария Ериолова	Грузо-пасс.	Неогр.	4367	Балласт	227	227	10,9	10,9		+	+	+	
				Груз	227	227	10,9	10,9		+			+
				Балласт	274	392	6,3	9,0				+	
				Груз	224	327	5,1	7,5					+

Таким образом, любые изменения нагрузки в пределах состояний «судно в балласте» – «судно порожнем», чреватые высокой вероятностью аварийных происшествий (например, переломы корпусов судов «Волго-Балт 38», «Кристина», «Стрелец» произошли во время балластного перехода [5], судно «Flare» погибло при смене балласта перед приходом в Канаду [14]).

Для состояния с грузом ограничение по общей продольной прочности является определяющим: для 2 из 8 рассмотренных навалочных судов неограниченного района плавания; для 1 из 4 рассмотренных наливных судов ограниченного района плавания; для 1 из 3 рассмотренных наливных судов неограниченного района плавания.

Для состояния с зерновым и палубным грузом ограничение по остойчивости является определяющим: для 16 из 21 рассмотренного сухогрузного судна ограниченного района плавания; для 8 рассмотренных сухогрузных судов неограниченного района плавания; для 2 из 8 рассмотренных навалочных судов неограниченного района плавания.

ВБ также может приниматься наливными судами при перевозке тяжелых наливных грузов (патока, каустическая сода и т.п.) для обеспечения требований непотопляемости. Примером могут служить танкера типа «Илья Эренбург», на которых требования к одноотсечной непотопляемости при перевозки патоки выполняются только при приеме ВБ.

Для судов, у которых в силу несимметричности относительно ДП оборудования имеется в наличии строительный крен, необходим прием ВБ для его устранения (сухогрузные суда типа «Амур», сухогрузные суда типа «Сокол 1» и др.).

Результаты анализа опасностей при смене балласта в море представлены на рисунке 6.

**Гидродинамические удары при частичном заполнении отсеков.** При частичном заполнении отсеков возможен резонанс (совпадение частот колебаний свободной поверхности балласта в отсеке с частотой внешней возмещающей силы – волнения), который приводит к росту динамических нагрузок на конструкции поперечных, продольных переборок и борта от ударов ВБ. Ряд больших навалочных судов погибли из-за разрушения трюмов при приеме балласта в трюма (именно эти катастрофы заставили изучить проблему ударных нагрузок от жидкого груза при частичном заполнении помещений в море).

При относительно небольших балластных отсеках, имеющих длину не более  $0,13L$  и ширину не более  $0,6B$  оценку таких нагрузок можно произвести в соответствии с Правилами РС. Как правило, для таких помещений расчетные нагрузки при частичном заполнении не превышают нагрузок от полного заполнения балластом с учетом волнения и качки.

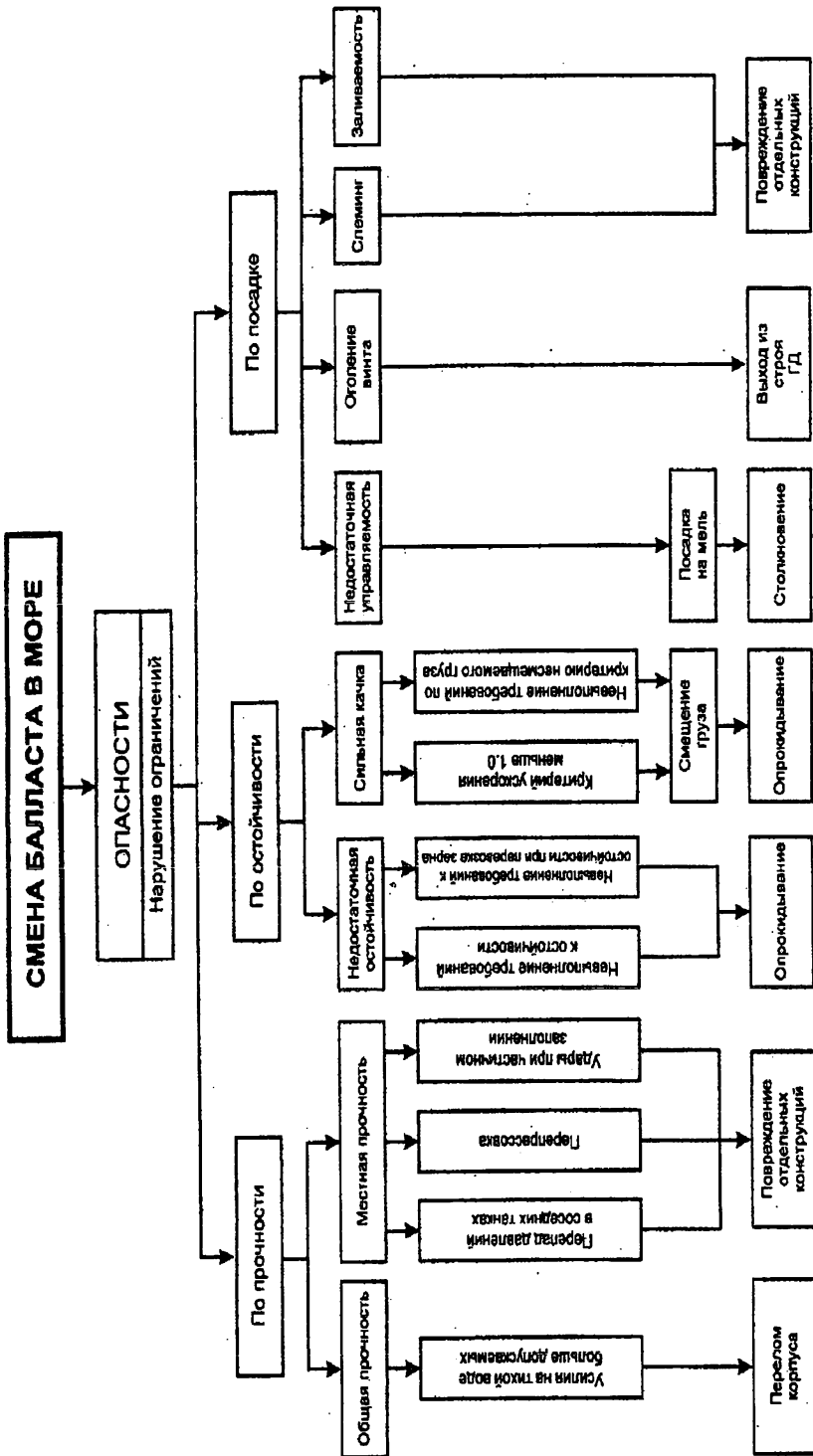
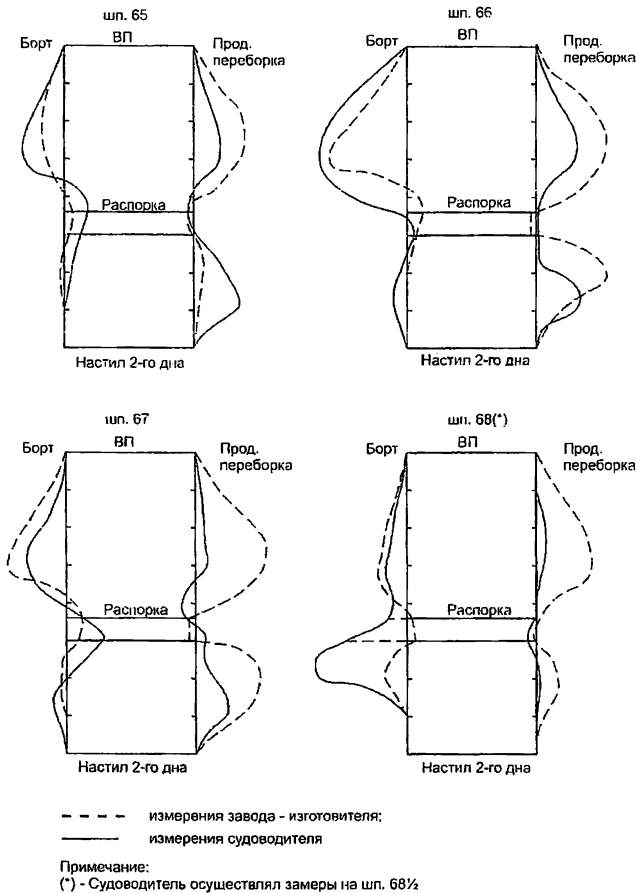


Рис. 6. Опасности для судна при смене балласта в море



Однако при неблагоприятном стечении обстоятельств даже в относительно небольших балластных отсеках возможны повреждения конструкций, если последствия ударов от ВБ в отсеке будут усилены недостатками конструкции, внешними ударами волн и пр. Например, принимая балласт во время рейса, танкер «Давид Баκραдзе» получил повреждения бортовых балластных цистерн (см. рисунок 7). Одной из возможных причин сильного деформирования переборок и борта могло быть частичное заполнение цистерн.



*Рис. 7. Деформации шпангоутных рам танка № 3 танкера «Давид Бакрадзе» после смены балласта в море*

Для балластных отсеков с большими относительными размерами (трюма навалочных судов, используемые для приема ВБ; грузовые танки наливных судов, применяемые для той же цели и пр.) нагрузки при частичном заполнении жидкостью могут быть весьма велики и превысить соответствующие проектные нагрузки.

В качестве примера была исследована возможность частичного заполнения трюма нефтерудовоза проекта 1570 балластом на волнении с

высотами волн 3 % обеспеченности 7,0 м. Длина трюма, который проверялся под безопасную эксплуатацию для смены балласта, составляет 70,4 м (63 % от длины судна L). Прием балласта в такие трюма на практике осуществляется, т.к. суда этого проекта имеют объемы балластных цистерн, обеспечивающие посадку в состоянии без груза с малой осадкой носом – около 1,20-1,40 м, что недостаточно для эксплуатации в море в классе R2-RSN.

Проведенные специальные расчеты экстремальных и эксплуатационных гидродинамических давлений водяного балласта на конструкции грузового трюма при качке судна на волнении при частичном заполнении показали, что максимальные величины гидродинамических давлений при частичном заполнении трюма балластом до уровня 2,55 м от настила второго дна составили 97,4 кПа при эксплуатационных и 123,9 кПа при экстремальных условиях. Данные величины значительно (более чем в 2 раза) превышают нагрузки от испытательного напора, который составляет 43,65 кПа. При этом нормальные напряжения в наиболее нагруженных нижних опорных сечениях холостых стоек поперечных переборок составили 96 % от допускаемых.

Обращает на себя внимание значительный уровень действующих нормальных напряжений, близкий к допускаемому уровню. При повышенных износах или конструктивных недостатках указанные нагрузки при частичном заполнении опасны.

**Перепрессовка цистерн.** Как уже ранее отмечалось, при смене ВБ в море существует также опасность перепрессовки балластных цистерн. Особая роль при смене балласта принадлежит воздушным трубам, которые обеспечивают свободный доступ воздуха в цистерны при осушении и выход его при приеме ВБ. Диаметр воздушных труб балластных цистерн не менее 50 мм, при этом величина суммарной площади живого сечения этих труб не менее 125 % величины суммарной площади наполнительных труб. При неисправном состоянии, когда сечение воздушных труб уменьшилось из-за обледенения, продуктов коррозии, механических повреждений, возможна перепрессовка балластных цистерн с деформированием переборок, ограждающих эту цистерну.

Подобные аварийные ситуации можно было избежать, применяя известные организационные мероприятия, а именно: контроль уровня заполнения ВБ; контроль свободного выхода ВБ из воздушных труб; контроль свободного выхода воздуха из воздушных труб; широкое применение заполнения цистерн самотеком; при использовании балластного насоса давление не должно превышать 0,15 МПа с контролем по манометру; не допускать образования ледовых пробок в воздушных и измерительных трубах; поддерживать в рабочем состоянии систему подогрева балластных цистерн (в случае ее наличия).

Примером таких решений может служить система прокачки балласта на судне проекта DCV36.

**Оценка риска смены балласта в море.** По степени повреждений, нанесенных людям, окружающей среде и техническим средствам, указанные ситуации условно классифицированы 5 уровнями последствий (см. таблицу 2) из работы [5]. Формальная оценка последствий определяется по 5-балльной шкале и обозначается УП.

Проведенный анализ мореходно-прочностных характеристик существующих судов во время смены балласта выявил следующие опасности:

- при неправильном порядке смены ВБ возможны проблемы с обеспечением общей прочности корпуса судна, возможные последствия – перелом корпуса судна (УП = 5);

- при появлении частично заполненных ВБ цистерн и трюмов остойчивость судна существенно снижается, возможные последствия – опрокидывание судна (УП = 5);

- при удалении ВБ из высоко расположенных цистерн происходит усиление качки судна, возможные последствия – смещение груза без потери судна (УП = 2...4 в зависимости от ущерба собственности, корпусным конструкциям и членам экипажа); смещение груза с последующим опрокидыванием судна (УП = 5); ухудшение условий обитания экипажа (УП = 1...2);

- при малой осадке носом возникают опасные удары волн в носовую оконечность (УП = 1...2 в зависимости от ущерба корпусным конструкциям);

- при малой осадке кормой винт судна оголяется, возможные последствия – выход из строя ГД (УП = 2...5 в зависимости от дальнейшего развития событий, которое может закончиться неплановым ремонтом, а может привести к потере судна в штормовых условиях);

- при малой средней осадке в штормовом море и под воздействием ветра судно плохо слушается руля, возможные последствия – посадка на мель, столкновение с другим судном (УП = 1...5 в зависимости от дальнейшего развития событий, которое может закончиться неплановым ремонтом, а может привести к потере судна);

- при появлении частично заполненных ВБ цистерн и трюмов возможно возникновение резонанса (совпадения частот собственных колебаний жидкости в частично заполненных цистернах и трюмах с частотой внешних воздействий со стороны волнения, что приводит к большим ударным нагрузкам для конструкции судна, вплоть до их разрушения), возможные последствия – повреждения корпуса судна (УП = 1...5 в зависимости от дальнейшего развития событий, которое может закончиться неплановым ремонтом, а может привести к потере судна в штормовых условиях);

- при приеме/сбросе ВБ будут возникать большие перепады давления воды в смежных помещениях, возможные последствия – повреждения корпуса судна (УП = 1...3);

Таблиця 2

*Классификация последствий аварий и аварийных ситуаций с судами*

Уровень последствий УП*	Степень повреждения		
	воздействие на людей	воздействие на окружающую среду	повреждение технических средств
1 – Light Incident	Нет	Нет	Ничтожное
2– Incident	Легкое телесное повреждение	Ничтожное	Незначительное
3 – Casualty	Серьезное, необратимое телесное повреждение	Существенное	Серьезное
4 – Serious Casualty	Потеря человеческой жизни	Критическое	Значительное
5 – Very Serious Casualty	Много человеческих жертв	Катастрофическое	Гибель судна
* – дано для справки обозначение происшествия в соответствии с «Международным Кодексом проведения расследований аварий и инцидентов на море», 1997 год			

- при применении проточного метода смены ВБ, а также при плохом контроле при последовательном методе смены ВБ, возможна перепрессовка цистерн, возможные последствия – повреждения корпуса судна (УП = 1...3).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что во время смены балласта возможно возникновение опасных ситуаций (в порядке степени тяжести последствий):

- потеря остойчивости, в том числе из-за смещения груза;
- перелом или сильные повреждения конструкций корпуса при нарушении ограничений по общей продольной прочности;
- аварийная остановка ГД;
- потеря управляемости;
- повреждения отдельных конструкций и палубных устройств из-за слеминга, заливаемости, нарушения ограничений ледовой категории.

Определение частоты воздействия определенных выше опасностей требует достаточного количества фактических данных по реальным ситуациям смены балласта в море, которых на сегодняшний день получено мало.

В такой ситуации можно использовать рекомендации [5] по определению величины условной вероятности  $P$ . Условная вероятность  $P$  определялась по 5-балльной шкале («1» – частота возникновения в 0-20 % аварийных случаях, «2» – 21-40 %, «3» – 41-60 %, «4» – 61-80 %, «5» – 81-100 %).

Косвенным способом определения частоты воздействия той или иной опасности могут служить результаты анализа влияния смены балласта на посадку, остойчивость и общую прочность 50 типовых проектов судов.

Например, опасность нарушения ограничений по общей прочности во время перехода без груза, в балласте имеет место для 38 % исследованных сухогрузных судов ограниченного района плавания (условная вероятность  $P = 2$ ), для 25 % исследованных сухогрузных судов неограниченного района плавания (условная вероятность  $P = 2$ ), для 100 % исследованных навалочных, наливных и комбинированных судов (условная вероятность  $P = 5$ ).

Опасность нарушения ограничений по остойчивости во время перехода с палубным или зерновым грузом (для тех случаев, когда они принимают балласт до выхода в рейс) имеет место для 76 % исследованных сухогрузных судов ограниченного района плавания (условная вероятность  $P = 4$ ) и для 100 % исследованных сухогрузных судов неограниченного района плавания, для 25 % исследованных навалочных судов (условная вероятность  $P = 2$ ).

Обобщенный уровень риска  $R$  может определяться как произведение вероятности возникновения опасности  $P$  на последствия воздействия указанной опасности на объект УП.

Для сухогрузов ограниченного района плавания при переходах порожнем, без груза условный риск нарушения общей продольной прочности при смене балласта в море составит  $R = 10$ , риск потери остойчивости при переходах с тяжелым зерном (с УПО менее 1,20 м<sup>3</sup>/т) и с грузом леса на палубе  $R = 20$ .

Для навалочных судов при переходах порожнем, без груза условный риск нарушения общей продольной прочности при смене балласта в море составит  $R = 25$ , риск потери остойчивости при переходах с тяжелым зерном  $R = 10$ .

Требуются дальнейшие исследования в части моделирования возможных ситуаций при смене балласта в море с учетом вероятности ошибки оператора и ошибки прогноза с выходом на экономические оценки в рамках методов оценки риска.

**Контроль и управление риском. Процедура по безопасной смене балласта в море.** Таким образом, смена балласта в море для существующих судов может представлять реальную опасность. Поэтому требуемый по стандарту D-1 План управления балластными водами для существующих судов должен обеспечить контроль риска по следующим позициям:

- изгибающие моменты, перерезывающие силы, крутящие моменты (если требуется) не должны превышать допускаемых РС для данного района плавания, возможные дополнительные меры управления риском – установление специальных ограничений по ветро-волновым условиям;
- остойчивость с учетом поправок на свободные поверхности в частично заполненных цистернах должна быть не ниже требуемых РС;
- критерий ускорения должен быть не менее 1,0, возможные меры – установление специальных ограничений по ветро-волновым условиям;
- осадка носом должна быть не менее безопасной по слемингу величины, возможные меры – установление специальных ограничений по ветро-волновым условиям;
- осадка кормой должна обеспечивать достаточное для работы ГД погружение винта, возможные меры – установление специальных ограничений по ветро-волновым условиям;
- средняя осадка должна быть достаточна для безопасного управления судном, возможные меры – установление специальных ограничений по ветро-волновым условиям;
- ситуации с возникновением гидродинамических ударов при частичном заполнении следует спрогнозировать расчетным путем и, по возможности, избегать, возможные меры – установление специальных ограничений по ветро-волновым условиям;
- избегать при приеме-сбросе ВВ больших перепадов давления воды в смежных помещениях, не проверенных расчетом местной прочности конструкций цистерн и трюмов; должны быть приняты меры по недопущению перепрессовки цистерн.

При разработке Плана управления балластными водами для конкретного судна могут потребоваться изменения в действующих на борту эксплуатационных документах с целью унификации ограничений и обеспечения взаимного согласования требований к состояниям загрузки судна.

Важно, чтобы процедура контроля за балластными операциями и осадками была эффективной и безопасной для окружающей среды, практически выполнимой, разработанной таким образом, чтобы довести до минимума стоимость балластировки и задержки судна. Следует принять меры по исключению ненужного сброса балластных вод.

План должен включать все случаи загрузки, при которых производится прием/откачка дополнительного балласта из «Информации об остойчивости и прочности для капитана», «Информации об остойчивости при перевозке зерна», «Информации об остойчивости и прочности при перевозке навалочных грузов», «Инструкции по загрузке», а также иные варианты загрузки, связанные с условиями эксплуатации конкретного судна.

Для каждого случая загрузки должны быть определены допустимые методы смены балласта в море и соответствующие им состояния окружающей среды. В случае возможности использования двух методов смены балласта (последовательного и проточного), каждый метод должен быть описан отдельно.

Должны быть определены обстоятельства, при которых недопустимо производить замену балластной воды. Такие обстоятельства могут возникать в результате критических ситуаций исключительного характера или форс-мажорных обстоятельств из-за стихии или других обстоятельств, при которых человеческая жизнь или безопасность судна находятся под угрозой.

Такая «Инструкция» должна быть разработана на каждое конкретное судно, с учетом его конструктивных и эксплуатационных особенностей, а также особенностей района эксплуатации, с указанием зон, где можно безопасно принимать ВБ, безопасно менять ВБ и допускаемыми при этом ветро-волновыми условиями.

**Системы обработки балластных вод.** В 2016 году из всех судов, заходивших в порт Новороссийск, менее 2,5% были оснащены СОБВ [7].

Остальным судам дан переходный период – они должны быть дооборудованы СОБВ к первому после 8 сентября 2017 года очередному освидетельствованию.

Морское Инженерное Бюро показало как в новых проектах RST25, RST27, RSD49 и SDS18 такие системы устанавливаются (или могут быть установлены, так как с постройки были предусмотрены место установки и соответствующие подключения к балластной системе и к судовой электростанции) – см. рисунки 8-13 и таблицу 3.

По экспертным оценкам, для нового (т.е. построенного относительно недавно) судна «Волго-Дон макс» класса такая СОБВ в зависимости от производителя стоит около 210-270 тыс. долларов, а с учетом работ расходы составят до 350 тыс. долларов на судно.

Для судов «советской» постройки расходы могут быть существенно выше, так как есть сложности с размещением СОБВ, вполне вероятно, что будет недостаточна мощность судовой электростанции, что может потребовать замены дизель-генератора и т.п.

Следует оценить время, которое требуется для обработки водяного балласта, так как при этом будет работать судовая электростанция и будет расходоваться дополнительное топливо – см. пример в таблице 4 для ряда типовых судов, поднадзорных РС.

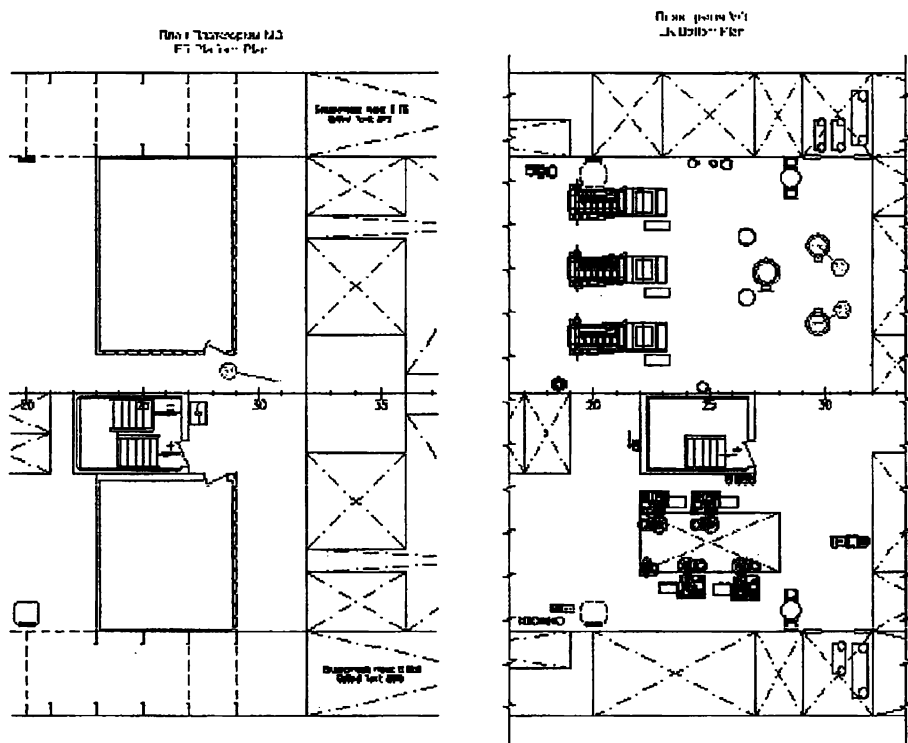


Рис. 8. Расположение оборудования СОБВ на танкере проекта RST25

Таблица 3

Сводная таблица применяемого оборудования

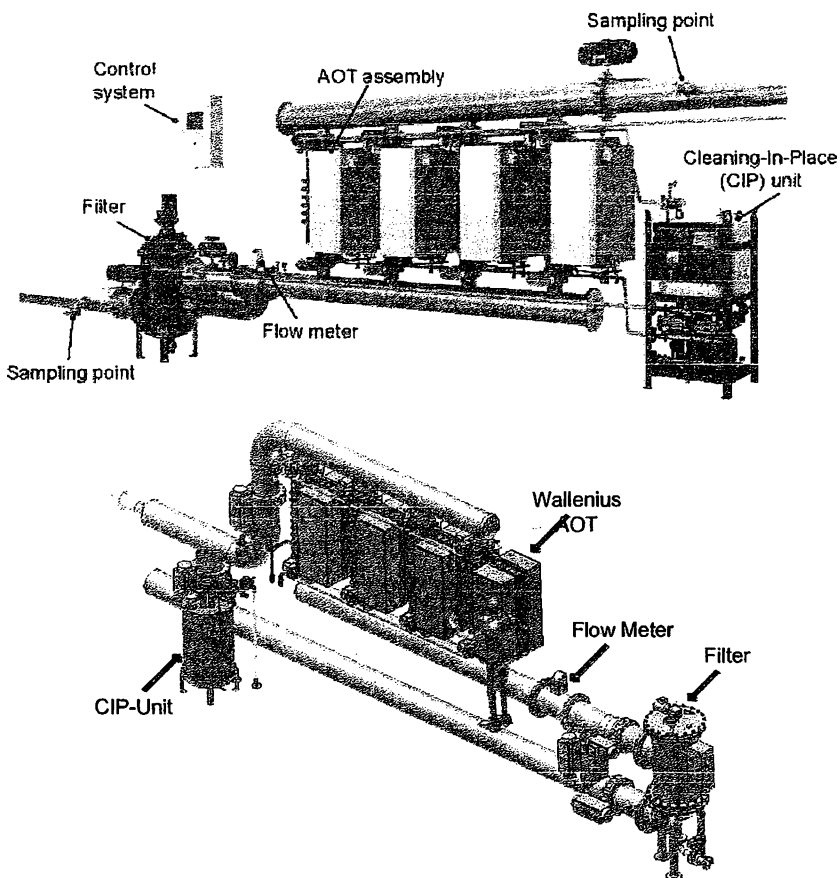
Проект судна	Фирма-производитель	Название комплекса	Производительность, м <sup>3</sup> /час
RST25 (танкер-продуктовоз)	Alfa Laval	PureBallast 2.0	500
RST27 (танкер-продуктовоз) СУБВ размещена в грузовой зоне	Wartsila	AQUARIUS AQ-850-UVX	Прием 200-800; выкатка балласта 70-800
RSD49 (многоцелевое сухогрузное судно)	Alfa Laval	PureBallast 3.1	500
SDS18 (многофункциональное морское водолазное судно-катамаран)	Headway	OceanGuard HMT-50	Прием 25-50, выкатка балласта 20-50

Как было отмечено в докладе главного специалиста механического отдела РС В.К. Шурпяка [12] на конференции «Имплементация в России Балластной конвенции», при разработке проекта установки СОБВ на существующих судах необходимо обеспечить следующее:



## PureBallast Components

- 1000 m<sup>3</sup>/h system



*Рис. 9. Внешний вид оборудования СОБВ, устанавливаемый на танкере проекта RST25*

- судовое пространство для размещения системы и ее трубопроводов;
- достаточную мощность судовой электростанции;
- наличие балластных насосов необходимого напора с учетом потерь давления в системе обработки балластных вод;
- доступ для возможности удаления осадков и их выдачи в приемные сооружения;
- доступ для отбора проб балластных вод и осадков;
- учесть возможные особенности конструкции существующей балластной системы (балластные насосы расположены в разных помещениях, несколько выпускных отверстий, грузовой танк используется как балластный танк и пр.).

*Таблица 4*

*Определение времени, необходимого для обработки балласта,  
для группы типовых судов, поднадзорных РС*

Номер проекта	Тип	Назначение	Dwt, т	Балласт, т	Суммарная производительность балластных насосов, м <sup>3</sup> /час	Время необходимое для обработки балласта, час
1557	Сормовский	Сухогруз	3 353	1 688	180	18
1743	Омский	Сухогруз	3 104	1 466	252	11
0225	Сибирский	Сухогруз	4 409	2 253	430	10
2-95	Волго-Балт	Сухогруз	3 208	1 704	340	10
326.1	СТК	Сухогруз	1 347	951	156	12
19610	Волга	Сухогруз	5 845	2 141	450	9
92-040	Амур	Сухогруз	3 332	1 844	446	8
1568	Капитан Кушнаренко	Сухогруз	16 618	2 044	460	9
1572	Кишинев	Сухогруз	4 616	2 062	268	15
1585	Герои Панфиловцы	Сухогруз	15 818	2 270	300	15
1586	Николай Жуков	Сухогруз	7 682	1 677	200	16
15941	Харитон Греку	Массовые и навалочные грузы	52 642	26 713	1200	43

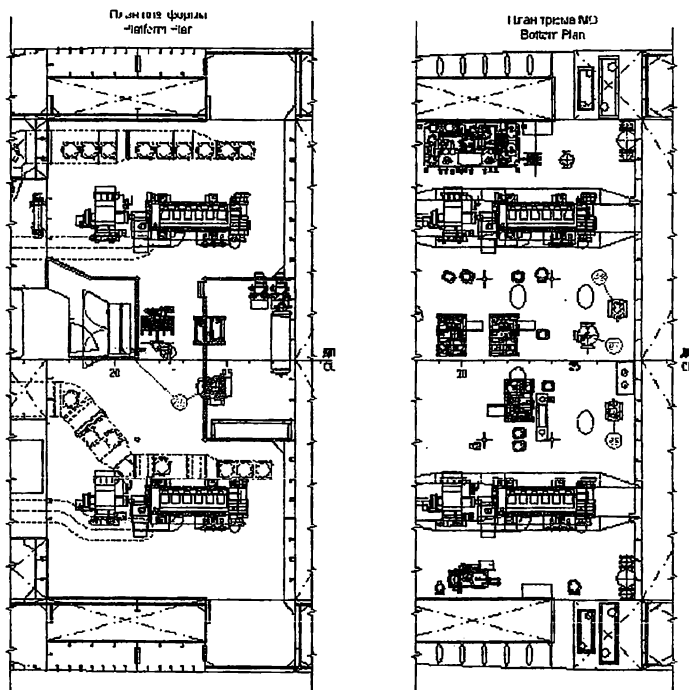


Рис. 10. Расположение оборудования СОБВ на сухогрузном судне проекта RSD49

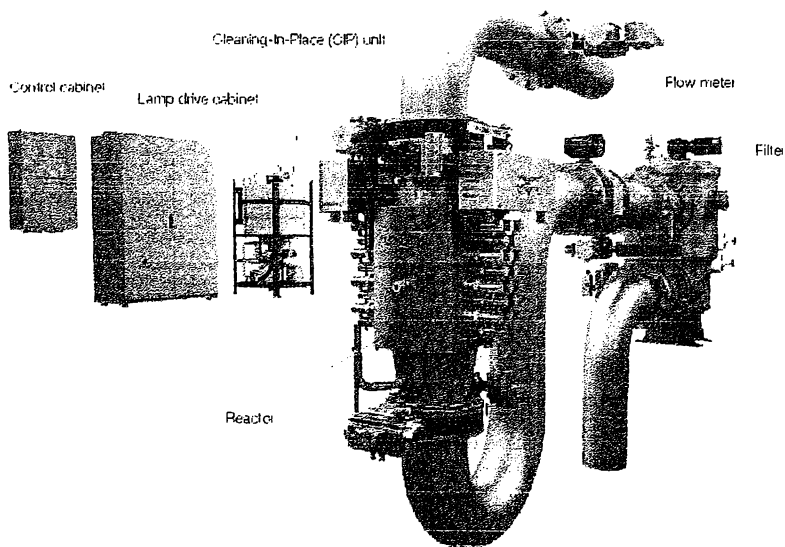


Рис. 11. Внешний вид оборудования СОБВ, устанавливаемый на сухогрузном судне проекта RSD49

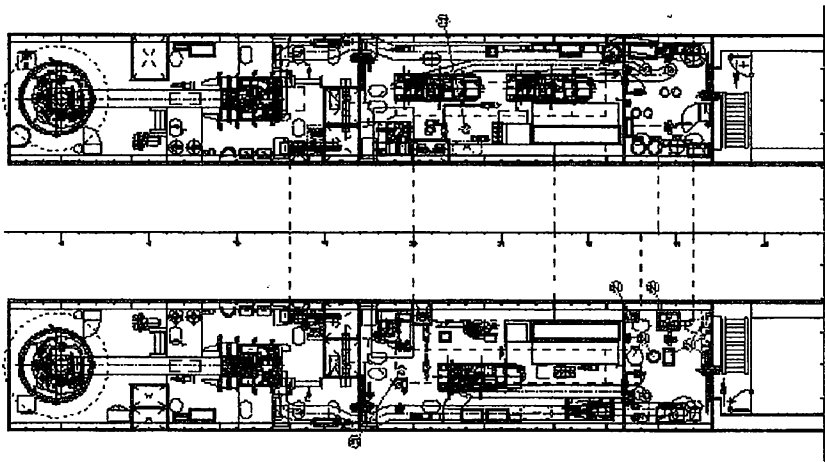


Рис. 12. Расположение оборудования СОБВ на водолазном судне катамаране проекта SDS18

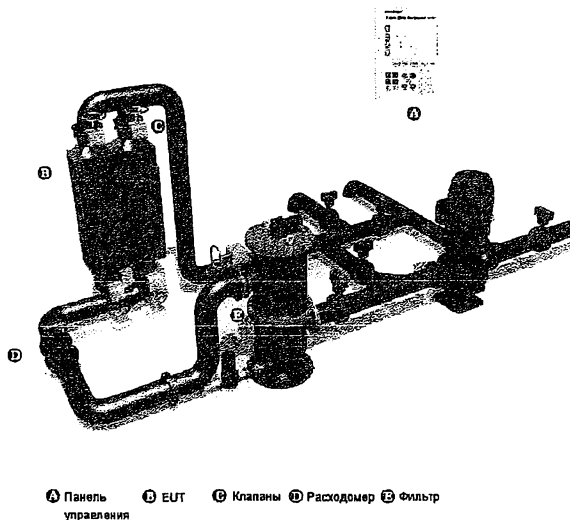


Рис. 13. Внешний вид оборудования СОБВ, размещаемый на водолазном судне катамаране проекта SDS18

Затраты по приведению к требованиям BWM-2004 на таком судне уже могут быть близки к 500-800 тыс. долларов и выше.

Как отметило ИАА «ПортНьюс», представитель судостроительной группы Damen (Нидерланды) Петер Анссемс заявил, что с 8 сентября 2017 года появится необходимость в 20-40 модернизациях судов для установки СОБВ в день во всем мире. Группа Damen разработала систему InvaSave, которая является оптимальным решением для реализации Конвенции по управлению балластными водами.

Система InvaSave является первой в мире системой очистки балластных вод, которую можно использовать в морских портах как мобильную установку для тех судов, чьи владельцы не успеют или не захотят к сроку вступления в силу Конвенции переоснастить свои суда. InvaSave может поставляться в качестве автономного блока внутри контейнера. Система может затем быть установлена на барже или другой платформе для свободного перемещения по акватории порта. Для увеличения мощности очистки системы несколько блоков могут быть установлены параллельно.

В рамках конференции «Имплементация в России Балластной конвенции» состоялась церемония подписания декларации о намерениях поставки мобильной системы обработки балластных вод DAMEN компании ООО «Альянс» для портов Выборг и Высоцк.

**Выводы.** Таким образом, методы обработки ВБ и сдачи ВБ в портах в состоянии решить поставленную задачу, но стоимость подобных мероприятий высока.

Поэтому для существующих судов в рамках действующих технических и экономических условий в течение максимум пяти лет вполне возможен для реального применения метод смены балласта в районах с глубиной моря более 2000 м, в открытом море, за пределами 200-мильной прибрежной зоны.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Егоров Г.В. *Технические проблемы смены балласта в море для минимизации переноса вредных водных организмов и патогенов // Экологические проблемы Черного моря: Сб. научн. ст. / ОЦНТЭИ. – Одесса: ОЦНТЭИ, 1999. – С. 93-97.*
2. Егоров Г.В. *Идентификация опасностей и меры по снижению риска при смене балласта существующими судами в море // Судовождение: Сб. научн. трудов ОГМА. – Одесса: Латстар, 2001. – Вып. 3. – С. 64-75.*
3. Егоров Г.В. *Исследование риска повреждения корпусных конструкций при смене судами балласта в море // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2001. – С. 31-32.*
4. Егоров Г.В. *Минимизация влияния судоходства на окружающую среду с использованием метода формальной оценки безопасности: Сб. научн. трудов УГМТУ. – Николаев: УГМТУ, 2001. – № 5 (377). – С. 8-18.*
5. Егоров Г.В. *Анализ аварий корпусов судов ограниченных районов плавания // Проблемы техники. – 2002. – № 3. – С. 3-25.*

6. Егоров Г.В. Исследование возможности нормирования прочности корпусных конструкций на воздействия, неучитываемые в Правилах // Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта. – Владивосток: ДВГТУ, 2002. – Вып. 43. – С. 57-67.
7. Королев Н.А. Организация государственного портового контроля в рамках Международной конвенции о контроле водяного балласта и осадков судов на примере морского порта Новороссийск // Имплементация в России Балластной конвенции: презентации докладов конференции. ИАА «Портньюс». – М.: Торгово-промышленная палата, 2017.
8. Лиманчук С. Перенос чужеродных водных организмов через океаны // Морской флот. – № 3. – 2001. – С. 20-22.
9. Полникова А.П. Результаты анализа качественного состава балластных вод, сброшенных в северо-западную часть Черного моря за 1997-2001 гг. // Экологические проблемы Черного моря: Сб. материалов 4-го Международного Симпозиума. – Одесса: ОЦНТЭИ, 2002. – С. 172-180.
10. Решетов Н.А., Парфенов Л.Я. Проблемы ограничения сброса балластных вод // Морской флот. – № 5. – 2002. – С. 28-29.
11. Фащук Д.Я., Сапожников В.В. Антропогенная нагрузка на геосистему «море-водосборный бассейн» и ее последствия для рыбного хозяйства (методы диагноза и прогноза Черного моря). – М.: Издательство ВНИРО, 1999. – 124 с.
12. Шурпяк В.К. Выполнение требований Международной конвенции по контролю и управлению судовыми балластными водами и осадками, 2004 года // Имплементация в России Балластной конвенции: презентации докладов конференции. ИАА «Портньюс». – М.: Торгово-промышленная палата, 2017.
13. Halvorsen E. Alien organisms threaten marine ecosystem // DNV Forum. – 2000. – № 3/2000. – P. 32-33.
14. The spectre of shipping lost // The Naval Architect. – June 2001. – P. 51, 53.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2017

#### Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, професор, завідувач кафедри «Машинознавство» Одеського національного морського університету  
**А.В.Конопльов**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету  
**А.В.Гришин**

УДК 621.181.2

А.Г. Данилян, В.И. Чимшир

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК И БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ СДВС ОТ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

*Проведенные длительные исследования на Измашльском судоремонтном заводе Украинского Дунайского пароходства одним из авторов статьи позволили открыть новое, до того времени неизвестное явление, усиливающее кавитацию поверхности цилиндрических втулок и блоков судовых двигателей внутреннего сгорания. Это явление было обнаружено на цилиндрических втулках двигателей с нарушенной центровкой (привалкой) цилиндропоршневой группы ЦПГ двигателей, где нормальная сила  $N$  сопряжения поршень-втулка в связи с этим явлением значительно увеличивалась. При увеличении нормальной силы  $N$  на поверхности втулки наблюдались волновые явления её стенок, что и приводило к интенсивному появлению кавитационных пузырьков, при схлопывании которых высвобождалась гидродинамическая и тепловая энергия, в результате чего на поверхности втулок в районе максимального усилия силы  $N$  появлялись глубокие кавитационные язвы.*

*Продолжая исследование, авторами статьи были найдены новые причины появления эффекта кавитации втулок и блоков судовых двигателей морских и речных судов во внутреннем контуре охлаждения из-за увеличенной скорости циркуляции воды в блоке двигателя. Было найдено действенное комплексное предложение по устранению этого опасного явления, разрушающего детали остова двигателя, которое нашло свое широкое применение на судах торгового и рыбного флота.*

**Ключевые слова:** кавитация, язвы, наделка, цилиндрическая втулка, блок цилиндров, судовой двигатель, сила.

*Проведені тривалі дослідження на Ізмаїльському судноремонтному заводі Українського Дунайського пароплавства одним з авторів статті дозволили відкрити нове, до того часу невідоме явище, що підсилює кавітації поверхні циліндричних втулок і блоків судових двигунів внутрішнього згорання. Це явище було виявлено на циліндричних втулках двигунів з порушеною центровкою (привалкою) циліндропоршневої групи ЦПГ двигунів, де нормальна сила  $N$  сполучення поршень-втулка в зв'язку з цим значно збільшувалася. При збільшенні нормальної сили  $N$  на поверхні втулки спостерігалися хвильові явища її стінок, що і призводило до інтенсивної появи кавітаційних бульбашок, при схлопуванні яких вивільнялася гідродинамічна і теплова енергія, в результаті чого на поверхні втулок в районі максимального зусилля сили  $N$  з'являлися глибокі кавітаційні язвини.*

*Продовжуючи дослідження, авторами статті були знайдені нові причини появи ефекту кавітації втулок і блоків судових двигунів морських і річкових суден у внутрішньому контурі охолодження через збільшену швидкість циркуляції води в блоці двигуна. Було знайдено дієву комплексну пропозицію щодо усунення цього небезпечного явища, що руйнує деталі остова двигуна, яке знайшло широке застосування на судах торгового і рибного флоту.*

**Ключові слова:** кавітація, язвіни, надялишки, циліндрова втулка, блок циліндрів, судовий двигун, сила.

*The long-term at the Izmail Shipyard of the Ukrainian Danube Shipping Company, one of the authors of the article, made it possible to open a new phenomenon, which until then had not been known, which enhances the cavitation of the surface of the cylinder bushings and blocks of the ship internal combustion engines. This phenomenon was found on cylinder liners of engines with broken centering (clamping) of the cylinder-piston group of the GPG of engines, where the normal force  $N$ , the coupling of the piston-bush, in this connection increased significantly. With an increase in the normal force  $N$  on the surface of the sleeve, the wave phenomena of its walls were observed, which resulted in the intense appearance of cavitation bubbles, in the collapse of which, hydrodynamic and thermal energy was released. As a result, deep cavitation ulcers appeared on the surface of the sleeves in the region of the maximum force of force  $N$ . Continuing the study, the author of the article found new reasons for the appearance of the effect of cavitation of bushings and blocks of ship engines of sea and river vessels in the internal cooling circuit due to the increased speed of water circulation in the engine block. An effective comprehensive proposal was found to eliminate this dangerous phenomenon, which destroys the details of the engine core. Which has found its wide application on the vessels of the commercial and fishing fleet.*

**Keywords:** cavitation, sores, fitting, cylinder hub, block of cylinders, ship engine, power.

**Постановка проблеми.** Кавитационное разрушение является одним из наиболее опасных явлений для деталей судового двигателя внутреннего сгорания (СДВС), которые контактируют с охлаждающей водой. Процесс кавитации определяется образованием парогазовых пузырьков в зоне пониженного давления с последующим их схлопыванием в пороговой зоне повышенного давления. В момент схлопывания парогазового пузырька происходит высвобождение термической и кинетической энергии, способной привести в конечном результате к эрозии поверхности детали.



**Целью статьи** является нахождение самых действенных технологических мер, способных локализовать вредное воздействие кавитации на детали остова судового двигателя. Создание конечных технологий позволило найти и изучить ряд явлений, проделав определенную исследовательскую работу.

**Изложение основного материала.** Явление кавитации носит локальный характер и возникает только там, где создаются соответствующие условия, причем, без возможности перемещения в среде возникновения [2]. Сам процесс кавитации – явление многофакторное и до конца не изученное. Примером тому может служить данное исследование, в котором рассматриваются причины кавитационного разрушения на омываемой поверхности втулки как факт изменения скорости охлаждающей воды в зарубашечном пространстве двигателя.

Причиной таких разрушений может быть нарушение сечений профиля протока воды вследствие полученных дефектов при отливке самого блока двигателя. Такие же разрушения можно наблюдать под воздействием электрохимической реакции внутри блока СДВС, волновой природы деформации цилиндрических втулок, при появлении гидравлических ударов во внутреннем контуре двигателя, изменении температурного режима выше установленного значения, растворении газа в охлаждающей воде и др. [1].

На рис. 1 схематично показан процесс кавитационного разрушения охлаждаемых водой деталей СДВС.

Согласно полученным опытным данным по одному из основных направлений процесса кавитации рассмотрим вибрацию втулок и причины, порождающие это явление, при эксплуатации судовых дизелей.

Динамика цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя создает основные условия для кавитационного явления. В момент движения поршня у ВМТ под действием нормальной силы  $N$ , направленной перпендикулярно к зеркалу втулки, создается резкое увеличение скорости в поперечном движении поршня, вследствие чего происходит удар поршня о стенку цилиндра, и под воздействием ударного импульса создаются местные упругие деформации волнообразного характера [3], которые волнообразно распространяются в радиальном и продольном направлениях относительно образующей поверхности.

Во время работы двигателя на поршень действует суммарное усилие

$$P_{\Sigma} = P_z - P_{nn} + P_j + P_g,$$

где  $P_z$  – давление газов, МПа;

$P_{nn}$  – давление газов в подпоршневой полости, МПа;

$P_j$  – условное давление сил инерции поступательно движущихся масс, МПа;

$P_g$  – условное давление веса движущихся масс, МПа.



*Рис. 1. Схема процесса кавитационного разрушения охлаждаемых полостей СДВС*

Сама нормальная сила будет равна

$$N = P_{\Sigma} * \operatorname{tg} \beta_{ш},$$

где  $\beta_{ш}$  – угол между осью цилиндра и осью шатуна [1].

В результате натуральных наблюдений констатировался факт увеличения нормальной силы  $N$  при нарушении центровки ЦПГ на четырехтактных СДВС. Поршень при движении к верхней мертвой точке (ВМТ) приобретал дополнительное усилие ударного импульса за счет деформации шатуна или нарушения соосности посадки верхнего бурта цилиндровой втулки, и как следствие это приводило к увеличенной кавитации стенки втулки в районе приложенного усилия ударной нагрузки. Как показали дальнейшие исследования, это явление становилось фактом некачественного ремонта, либо нарушения технической эксплуатации СДВС.

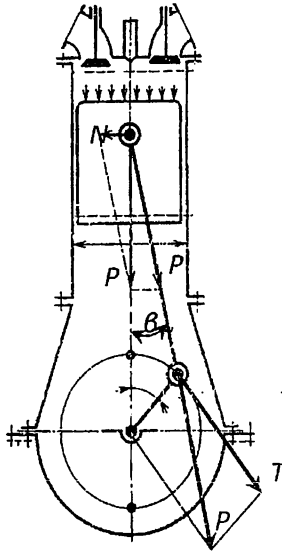


Рис. 2. Динамика сил, действующих на ЦПГ и кривошипно-шатунный механизм двигателя

Теоретические исследования природы кавитационных разрушений показали, что под воздействием ударного импульса волнообразная упругая деформация втулки приводит к акустическому волнообразному эффекту, который воздействует на пограничный слой омываемой водой поверхности втулки, попеременно производит его растяжение и сжатие. Сам волновой процесс растяжения и сжатия ведет к образованию кавитационных пузырьков, которые циклично под воздействием сил растяжения вытягиваются, а под воздействием сил сжатия схлопываются.

В момент схлопывания и концентрации пузырьков в имеющихся пустотах на поверхности втулок происходит гидродинамический эффект микропотоков воды, которые с большой скоростью ударяются о стенки втулок, тем самым разрушая их поверхность, постоянно бомбардируя их скоростными микропотоками воды. Давление в микрообъеме бомбардируемого микропотока достигает 1000-1500 МПа, а предел текучести высококачественного серого чугуна 200-400 МПа. Это приводит на первой стадии разрушения поверхности втулки к наклепу, а затем разбивает эрозию поверхности, и как правило, в сочетании с коррозией и другими вредными воздействиями способствует скоротечному разрушению поверхности цилиндрической втулки.

Кавитационные разрушения концентрируются на отдельных участках поверхности втулки и занимают определенное положение относительно направления потока охлаждающей воды, вращения коленвала двигателя, и как говорилось выше, наибольшему разрушению подвергаются участки максимальной ударной нагрузки на стенку втулки по вектору нормальной силы  $N$ .

Из практики известно, что поверхности втулок имеют больший кавитационный износ со стороны входа охлаждающей воды, чем поверхности со стороны выхода [4]. Блоки, охлаждаемые с давлением внутреннего контура до 0,2 МПа, имеют повышенный кавитационный износ, при повышении давления до 0,3-0,35 МПа данный износ снижается.

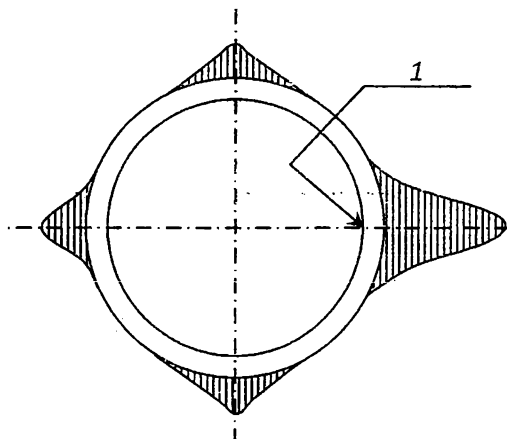


Рис. 3. Схема интенсивности кавитационного разрушения втулки:  
1 – поверхность втулки, испытывающая максимальную ударную нагрузку

Неслучайно интенсивность кавитационного разрушения чаще всего наиболее активно проявляется на поверхности цилиндрических втулок высокооборотных и среднеоборотных СДВС вследствие ударной нагрузки, приводящей к колебательному процессу, описанному выше. Процесс колебаний втулок, характеризуется колебательным ускорением  $W$  м/сек<sup>2</sup>,

$$W = A(2\pi f)^2,$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, м;

$f$  – частота свободных колебаний, Гц.

Колебания поршня происходят на величину зазора между поршнем и зеркалом втулки в горизонтальной плоскости.

По заключению ряда научных НИИ определен порог величины ускорения, он находится в диапазоне 18-20 g. Выше этих значений кавитационное разрушение втулок приведет к их замене до установленной нормы наработки заводом-изготовителем.

На сегодняшний день рядом ведущих дизелестроительных компаний проведены мероприятия по защите цилиндрических втулок и блоков цилиндров от кавитационных разрушений с применением технологий по демпфированию цилиндрических втулок, снижению аэрации охлаждающей

воды за счет переоборудования расширительной цистерны внутреннего контура охлаждающей воды двигателя. Схема защиты внутреннего контура оборудуется водным затвором, что предотвращает контакт внутреннего контура охлаждающей воды с атмосферой.

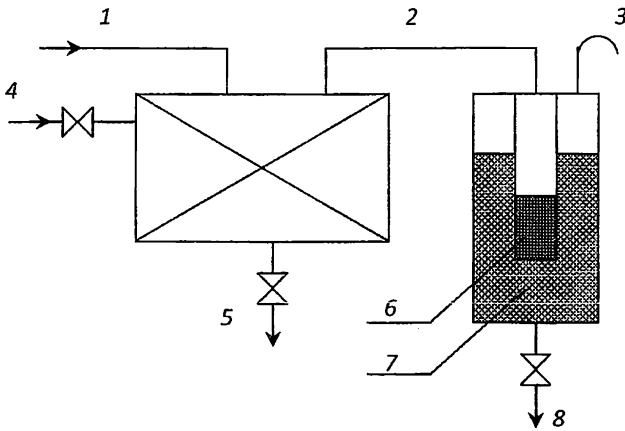


Рис. 4. Схема защиты внутреннего контура охлаждения СДВС от контакта с атмосферой:

- 1 – перелив от двигателя; 2 – соединительный трубопровод;  
3 – воздушная труба; 4 – пополнение; 5 – к насосу;  
6 – внутренний цилиндр; 7 – наружный цилиндр; 8 – слив

Данная схема значительно уменьшает коррозионное разьедание цилиндров и блока двигателя, коррозия и кавитация переходят в единый процесс разрушения поверхности, насыщенной парами и кислородом. Коррозионно-кавитационные процессы становятся наиболее активными в верхних посадочных поясах блоков и цилиндров двигателя благодаря скопившимся парам и газам, создающим застойные зоны, в которых снижается объемная прочность воды, что влечет за собой коррозионно-эрозийные разрушения втулок и блоков цилиндров.

Как и любое тело вода характеризуется определенными механическими свойствами. Одним из важнейших этих свойств является кавитационная или объемная прочность, которая зависит от сплошности жидкости, а та в свою очередь зависит от отрицательного давления, при котором наступает разрыв жидкости. Такой разрыв называют порогом кавитации. Доказано, что значение порога кавитации зависит от количества растворенного воздуха в жидкости. Исходя из этих наблюдений, были разработаны мероприятия по увеличению гидростатического давления над зеркалом воды, которое, воздействуя на газовые пузырьки, сжимает их, уменьшая радиусы пузырьков до полного предела сжатия, что препятствует их разрыву. Дальнейшее сжатие выше предела деформации пузырька

существенно не изменяет его радиус и малоэффективно для смещения порога кавитации [2; 4-6].

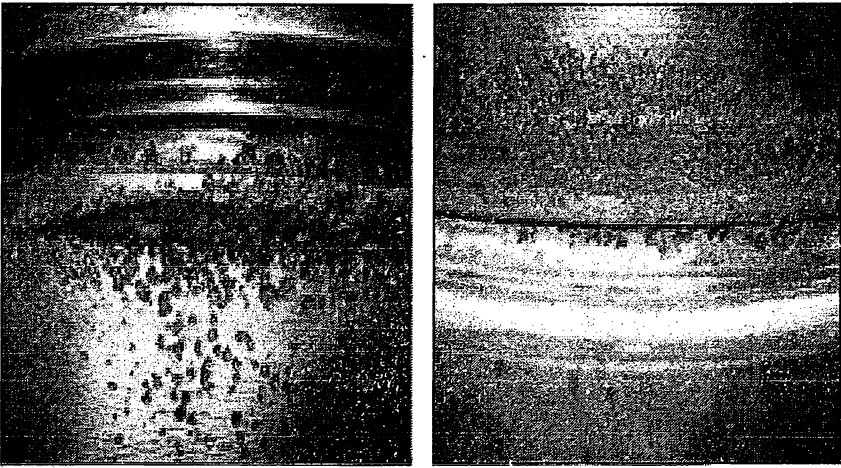
Проведенные эксперименты на ряде СДВС показали, что увеличение давления в контуре охлаждения двигателя до 0,4 Мпа резко повышает кавитационный порог. До этого применение антикавитационных присадок для охлаждающего внутреннего контура двигателя оказалось малоэффективным. Постоянно добавляя воду во внутренний контур, мы снижаем концентрацию присадки, которая, в ряде случаев, несовместима с присадками по снижению жесткости воды и кислородосодержанию. Стоимость антикавитационной присадки достаточно высокая, что делает ее не всегда доступной. Самыми действенными мерами защиты цилиндрических втулок и блоков двигателя от эрозийного разрушения вследствие кавитации могут быть защитные наделки и качественные покрытия на базе нанотехнологий.

Авторами данной статьи проводились наблюдения и практические работы в течение ряда лет на Измаильском судоремонтном заводе. Анализ проводился на ремонтируемых судах типа «Кишинев», буксирах-толкачах тип «Рига», «Иваново», сухогрузах тип «Эльва» и др. Кавитационные разрушения активно проявлялись на протяжении всего срока эксплуатации двигателей.

На вновь построенных судах с наработкой двигателей до 10 тыс. часов серии «Иваново», кавитационные разрушения наблюдались на поверхности цилиндрических втулок в районе ВМТ на хорде 1100-1200, высотой 130-140 мм, глубина язвин доходила до 1,5 мм. Кавитационные разрушения носили эрозийный характер с корродирующими включениями (рис. 5).

Регистром по надзору за судами было выставлено требование о замене цилиндрических втулок с кавитационными разрушениями. Впоследствии ст. мастером мехцеха завода Даниляном А.Г. и ст. технологом отдела Кашпаровым А.А. была разработана и предложена новая технология по изготовлению защитной наделки из стали 40ХН с креплением ее в местах эрозийного разрушения цилиндрических втулок.

Инспекция Регистра после согласования технологии в ЦНИИМФ установила промежуточный контроль за поведением кавитационного разрушения цилиндрических втулок и регламентировала осмтр их с подъемом через 2500 часов и 5000 часов работы двигателя после установки защитных наделок. Это предложение с высокой степенью антикавитационной защиты совмещалось с мероприятиями по созданию повышенного давления во внутреннем контуре охлаждения двигателя до 0,35 МПа морских судов, не более 0,25 МПа речных судов в виду невозможности установки расширительной цистерны на более высокий уровень во избежание выдавливания охлаждающей воды из внутреннего контура двигателя.



*Рис. 5. Кавитационное разрушение  
цилиндровых втулок судового двигателя*

В результате проведенной работы дальнейшее кавитационное разрушение цилиндрических втулок прекратилось как на поверхности антикавитационной накладки, так и под ней.

Предложенная и апробированная технология получила широкое применение на Измаильском СРМЗ Рыбной промышленности на судах типа «Пролив», «Форес», БМРТ, СРТ, а также нашла свое отражение в технической экспресс-информации Минморфлота [7].

В настоящее время имеются технические возможности по созданию новой технологии защиты цилиндрических втулок и блоков СДВС. В этой связи при подготовке научной статьи были проанализированы современные защитные компоненты, созданные на базе последних научных разработок зарубежных авторов с использованием нанотехнологий [8].

В связи с вышесказанным, авторами предлагается новая технология ремонта цилиндрических втулок и блоков двигателей от кавитационного разрушения на основе Полимерметалла -- ММ – metal SS – steelceramic. Данный Полимерметалл является материалом широкого диапазона применения для ремонта и технологического обслуживания всех металлов и сплавов. Материал имеет полное отсутствие контактной и электрохимической коррозии. По своим качествам, способен противодействовать с максимальной степенью защиты кавитационному разрушению, противостоит активным химическим средам.

В соответствии с проведенными исследованиями немецкой компанией MetalExistenceCompany данный материал обладает следующими техническими характеристиками [8]:

- прочность на сжатие (DIN ISO 604) 200 МПа;
- прочность на растяжение 83 МПа;
- температуростойкость от – 1500С до + 2800С.

Таким образом, в соответствии с предлагаемой технологией ремонта цилиндрических втулок, алгоритм работ производится следующим образом.

Ремонт посадочных буртов блока СДВС выполняется аналогичным способом. В зависимости от степени разрушения поверхности, как было сказано выше, может быть использовано применение армирования нержавеющей сеткой с нанесением защитного покрытия несколькими слоями в 1-1,5мм для обеспечения лучшей адгезии каждого слоя.

Расточка под размер нижнего посадочного бурта блока после обработки поверхности защитным покрытием MM – SS, выполняется борштангой с использованием карборундового камня или алмазным резцом для сухого резания. Особое внимание нужно уделить установке борштанги с обязательной выверкой базы по верхнему посадочному бурту блока цилиндров и осей посадочного нижнего бурта блока и мотылевых шеек коленвала в строгом соответствии последней  $900 \pm 1//$ .

Технические характеристики обработки посадочного бурта борштангой:

- скорость резания  $V_c = 30-125$  м/мин.;
- глубина резания  $a_p = 0,5-1$  мм;
- подача резания  $f = 0,1-0,2$  мм/об.

Выполнение ремонта нижнего посадочного бурта блока двигателя производится специализированными ремонтными подразделениями в портах, на судоремонтных заводах, либо на плановом заводском ремонте. Таким образом, незначительные кавитационные, коррозионные и др. разрушения посадочных буртов можно выполнять силами машинной команды.

**Выводы.** Восстановление цилиндрических втулок СДВС, согласно с предложенной технологией, позволяет без вывода судна из эксплуатации выполнить эти работы силами машинной команды со значительной экономией денежных средств.

Ранее эрозионное разрушение нижнего бурта блока цилиндров делало блок двигателя неремонтопригодным и он подлежал замене. Данная технология позволяет решить эту техническую задачу. Качество покрытия MM – SS не уступает защите от кавитации, контактной и электрохимической коррозии лучшим высоколегированным сталям и чугунам.

Впервые при описании процесса кавитации цилиндрических втулок было раскрыто явление, дополнительно увеличивающее нормальную силу  $N$ -давления поршня на зеркало втулки и ускорение поршня в горизонтальной плоскости за счет ухудшенной центровки ЦПГ.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение возможности использования предложенной технологии для ремонта верхнего посадочного бурта блока двигателя под цилиндрическую втулку, что является приоритетным направлением в судоремонте.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кошелев И.Ф. Справочник судового механика по теплотехнике [Текст] // И.Ф. Кошелев, А.П. Пимощенко. – Ленинград: Судостроение, 1987. – 480 с.
2. Кочетков Е.А. Кавитационные разрушения наружных поверхностей цилиндрических втулок судовых двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Е.А. Кочетков, А.С. Курылев // Морская техника и технологии: Сб. научн. трудов Астрах. гос. техн. ун-та. – Астрахань: Изд-во АГТУ. – 2000. – № 1. – С. 86-91.
3. Боровой И.В. Влияние кавитации цилиндрической втулки судовых ДВС на безопасность их эксплуатации [Текст] / И.В. Боровой // Морская техника и технологии: Сб. научн. трудов Астрах. гос. техн. ун-та. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2000. – № 1. – С. 95-98.
4. Юсуфов А.Р. Получение защитных покрытий многофункционального назначения поверхностным легированием отливок в литейной форме [Текст] / А.Р. Юсуфов, И.М. Абачаров // Морская техника и технологии: Сб. научн. трудов Астрах. гос. техн. ун-та. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2010. – № 1. – С. 69-72.
5. Подстрешный Е.В. Кавитационно-эрозионное изнашивание втулок цилиндров судовых СВД [Текст] / Е.В. Подстрешный, В.М. Ходаковский // Судостроение и судоремонт: Сб. научн. трудов. – Вып. 38. – Владивосток: Морск. гос. ун-т, 2012. – С. 7-11.
6. Борщевский Ю.Т. Повышение кавитационной стойкости двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Ю.Т. Борщевский, А.Ф. Мирошниченко. – К.: Высшая школа 1980. – 264 с.
7. Технология по ремонту цилиндрических втулок главных двигателей. – Измаил: ИСРЗ УДП, 1977. – 6 с.
8. Лист технических данных [Электронный ресурс] / MultiMetall. – P.O. Box Viersen Germany. Режим доступа: www/ URL: [http://multimetall.ru/download/tds/r\\_dbl\\_001\\_ss\\_steelceramic.pdf](http://multimetall.ru/download/tds/r_dbl_001_ss_steelceramic.pdf).

Стаття надійшла до редакції 20.11.2017

### Рецензенти:

кандидат технічних наук, доцент, механік першого розряду, завідувач кафедри СЕУ та систем Дунайського інституту НУ «ОМА»  
**І.З. Маслов**

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Інженерних дисциплін Дунайського інституту НУ «ОМА» **Т.В. Тарасенко**

УДК 532+697.94

І.А. Тузова, В.В. Челабчі, В.М. Челабчі

### ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКІВ В ЩІЛИННИХ КАНАЛАХ

*У статті описаний метод моделювання течій середовищ в щілинних каналах. Математична модель включає в себе систему рівнянь: нерозривності, Нав'є-Стокса (в проєкції на координатні осі) і рівняння тиску. Проблема розглядається в двовимірній постановці, тому використовуються змінні: функція струму і вихор. Члени з похідними другого і першого порядку в просторі апроксимуються методом Патанкара за триточковою схемою, а похідна за часом апроксимується неявною схемою.*

**Ключові слова:** щілинний канал, гідромеханіка, математичне моделювання.

*В статье описан метод моделирования течений сред в щелевых каналах. Математическая модель включает в себя систему уравнений: неразрывности, Навье-Стокса (в проекции на координатные оси) и уравнение давления. Проблема рассматривается в двумерной постановке, поэтому используются переменные: функция тока и завихренность. Члены с производными второго и первого порядка в пространстве аппроксимируются методом Патанкара по трехточечной схеме, а производная по времени аппроксимируется неявной схемой.*

**Ключевые слова:** щелевой канал, гидромеханика, математическое моделирование.

*Heat exchangers of the slotted channel type differ in small intervals between heat exchange surfaces. It is technically difficult, and sometimes impossible, to conduct a detailed experimental study of the flow characteristics of the working medium in the cracks. Computational (computer) experiment on the basis of mathematical modeling makes it possible to conduct research faster and cheaper, so the development of methods for mathematical modeling of transport processes in the slotted channels is urgent. The mathematical model includes the system of equations: continuity, Navier-Stokes (in the projection on the coordinate axes) and the pressure equation. The problem is considered in a two-dimensional enhancement, so variables are used: the current and vorticity function. The authors propose a new technique for simulating the flow of media in channels. Members with derivatives of the second and first order in space are approximated by the Patankar method in a three-point scheme, and the time derivative is approximated by an implicit scheme.*

**Keywords:** slotted channel, fluid mechanics, mathematical modeling.

**Вступ.** Підвищення ефективності теплообмінних пристроїв вимагає надійної інформації про процеси перенесення флюїдів в каналах. У промисловості та у морських енергетичних установках використовуються теплообмінники щілинного типу. Теплообмінники такого типу відрізняються малими проміжками між поверхнями теплообміну. Технічно складно, а іноді неможливо здійснити детальне експериментальне дослідження особливостей течії робочих середовищ в щілинних каналах.

Обчислювальний (комп'ютерний) експеримент на основі математичного моделювання дозволяє провести дослідження швидше й дешевше [1]. Особливо важливо забезпечити достатню вірогідність результатів, які одержані в експерименті при мінімізації витрат. Вірогідність інформації, що отримана в обчислювальному експерименті, в першу чергу залежить від адекватності математичних моделей. Методи моделювання мають бути з абсолютною стійкістю і зниженою методичною похибкою.

**Аналіз основних публікацій з проблеми.** Методам чисельного моделювання процесів перенесення присвячені роботи [1]-[10].

Загальна постановка проблеми детально описана в [1]. Різницеві методи висвітлені в [1; 6]. Використання методу Галеркіна описано в [4]. Детальний опис методу кінцевих елементів даний в [5].

У роботі [8] запропонований новий підхід до апроксимації рівняння конвективного перенесення. Вдосконалений метод чисельного моделювання конвективного перенесення описано в роботах [9-10].

**Об'єкт дослідження.** Як об'єкт дослідження обрано канал складного профілю (рис. 1). Подібні канали використовуються в охолоджувачах повітря побічно-випарного типу [11].

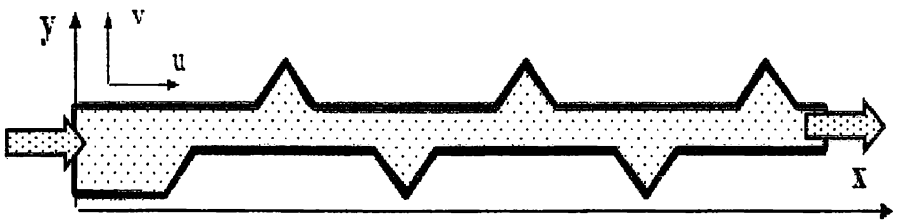


Рис. 1. Вид розглянутого каналу

**Математичні моделі.** Як математична модель приймається система рівнянь: нерозривності (1), Нав'є-Стокса у проекції на вісь  $x$  (2) та  $y$  (3), та рівняння тиску (4).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\rho \cdot \partial x} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\rho \cdot \partial z} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (4)$$

Перелік умовних позначень:

$x, y$  – відстань по координатних осях  $x, y$ , м;

$\tau$  – час, с;

$u$  – швидкість повітря по напрямку осі  $x$ , м/с;

$v$  – швидкість повітря по напрямку осі  $y$ , м/с;

$p$  – тиск, Па, Н/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;

Рішення системи рівнянь (1)-(4) чисельними методами представляє певні складності. Тому система рівнянь (1)-(4) записується в змінних: функція струму й вихор. Такий підхід зручний при рішенні задач у двовимірній постановці.

Використовується система рівнянь (5) та (6).

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \zeta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} + u \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

де  $\psi$  – функція струму, м<sup>2</sup>/с;

$\zeta$  – вихор, 1/с.

Разом з (5) і (6) використовуються вирази (7) і (8).

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v, \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (8)$$

У роботі використовується модифікована безрозмірна форма рівнянь, коли величини швидкості  $v, u$  представлені як природні змінні, а всі інші величини в безрозмірному виді. Такий підхід дозволяє використовувати розроблені алгоритми й процедури для рішення як лінійних, так і нелінійних задач.

У безрозмірному виді вираз (5) представлено (9).

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial Y^2} = W, \quad (9)$$

У безрозмірному виді вираз (6) представлено (10).

$$\frac{\partial W}{\partial H_0} + U \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right). \quad (10)$$

У безрозмірному виді вирази (7) і (8) представлені (11).

$$U = \frac{\partial F}{\partial Y}, \quad V = -\frac{\partial F}{\partial X}, \quad W = \frac{\partial U}{\partial Y} - \frac{\partial V}{\partial X}. \quad (11)$$

У (9)-(11) використані наступні позначення:

$$U = \frac{u}{u_0}, \quad V = \frac{v}{u_0}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad H_0 = \frac{u_0 \cdot \tau}{L}, \quad W = \frac{L \cdot \zeta}{u_0}, \quad F = \frac{\psi}{u_0 \cdot L},$$

де  $L = \delta_d$  – характерний розмір;  
 $u_0$  – характерна швидкість.

$$Re = \frac{u_0 \cdot L}{\nu} \text{ – число Рейнольда.}$$

**Граничні умови.** На нижній границі  $\psi = 0$  звідки  $F = 0$ . На верхній границі  $\psi = u_0 \cdot \delta$ . Отже, при  $L = \delta$ ,  $F = 0$ .

На обох границях  $u = v = 0$ . Отже,  $U = V = 0$ .

На вході в канал задається профіль швидкості  $u = f(y)$ . Значення  $v = 0$ . При цьому  $\zeta = 0$  ( $W = 0$ ).

На виході каналу використовуються умови (12).

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0 \quad \text{та} \quad \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial X^2} = 0 \quad \text{та} \quad \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} = 0. \quad (12)$$

**Різницєва апроксимація.** Різницєва апроксимація рівнянь (9), (11) проводиться згідно до схеми рис. 2.

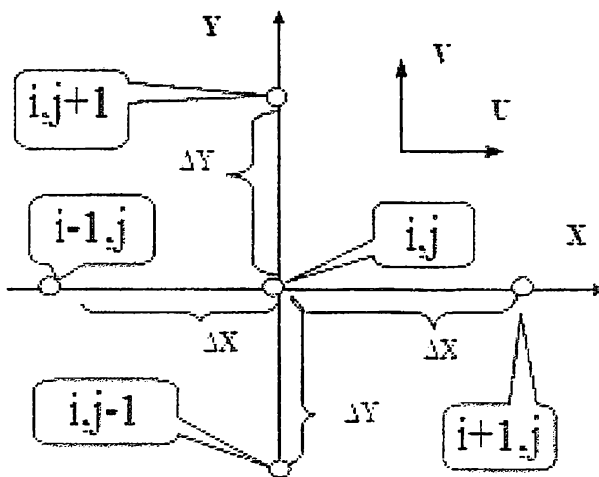


Рис. 2. Схема розміщення вузлів сітки

Рівняння Пуассона (9) апроксимується за допомогою центральних різницьових схем (13).

$$\frac{F_{i-1,j} + F_{i+1,j} - 2 \cdot F_{i,j}}{(\Delta X)^2} + \frac{F_{i,j-1} + F_{i,j+1} - 2 \cdot F_{i,j}}{(\Delta Y)^2} = W_{i,j} \quad (13)$$

Розрахункова формула має вигляд (14).

$$F_{i,j} = (F_{i-1,j} + F_{i+1,j}) \cdot \frac{(\Delta Y)^2}{2 \cdot (\Delta Y)^2 + 2 \cdot (\Delta X)^2} + (F_{i,j-1} + F_{i,j+1}) \cdot \frac{(\Delta X)^2}{2 \cdot (\Delta Y)^2 + 2 \cdot (\Delta X)^2} - W_{i,j} \cdot \frac{(\Delta Y)^2 \cdot (\Delta X)^2}{2 \cdot (\Delta Y)^2 + 2 \cdot (\Delta X)^2} \quad (14)$$

де  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  – кроки відповідно по осях  $X$  і  $Y$ .

При рівності кроків  $\Delta X = \Delta Y = \Delta L$  формула (14) спрощується (15).

$$F_{i,j} = (F_{i-1,j} + F_{i+1,j} + F_{i,j-1} + F_{i,j+1}) \cdot \frac{1}{4} - W_{i,j} \cdot \frac{(\Delta L)^2}{4} \quad (15)$$

Рівняння (10) перед різницевою апроксимацією перетворюється до (16).

$$\left( \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - U \cdot \text{Re} \cdot \frac{\partial W}{\partial X} \right) + \left( \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} - V \cdot \text{Re} \cdot \frac{\partial W}{\partial Y} \right) = \text{Re} \cdot \frac{\partial W}{\partial H_0} \quad (16)$$

Члени з похідними другого й першого порядку по просторі апроксимуються згідно [6,7] по триточковій схемі (17), (18), а похідна за часом апроксимуються за схемою «крок назад за часом» (19).

$$\left( \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - U \cdot \operatorname{Re} \frac{\partial W}{\partial X} \right) \approx \frac{1}{\Delta X^2} \cdot (W_{i-1,j} \cdot A_{X1} + W_{i,j} \cdot A_{X2} + W_{i+1,j} \cdot A_{X3}), \quad (17)$$

$$\left( \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} - V \cdot \operatorname{Re} \frac{\partial W}{\partial Y} \right) \approx \frac{1}{\Delta Y^2} \cdot (W_{i,j-1} \cdot A_{Y1} + W_{i,j} \cdot A_{Y2} + W_{i,j+1} \cdot A_{Y3}), \quad (18)$$

де  $\operatorname{Re} \cdot \frac{\partial W}{\partial H_0} \approx \operatorname{Re} \cdot \frac{W_{i,j} - W_{i,j}^*}{\Delta H_0}$ ,

$W_{i,j}^*$  – значення величини  $W$  в попередній момент часу.

Тоді різницева апроксимація (16) має вигляд (19).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta X^2} \cdot (W_{i-1,j} \cdot A_{X1} + W_{i,j} \cdot A_{X2} + W_{i+1,j} \cdot A_{X3}) + \\ & + \frac{1}{\Delta Y^2} \cdot (W_{i,j-1} \cdot A_{Y1} + W_{i,j} \cdot A_{Y2} + W_{i,j+1} \cdot A_{Y3}) = \operatorname{Re} \frac{W_{i,j} - W_{i,j}^*}{\Delta H_0} \end{aligned} \quad (19)$$

Розрахункова формула при рівності кроків  $\Delta X = \Delta Y = \Delta L$  має вигляд (20)

$$W_{i,j} = P_w \cdot \left( -W_{i-1,j} \cdot A_{X1} - W_{i+1,j} \cdot A_{X3} - W_{i,j-1} \cdot A_{Y1} - W_{i,j+1} \cdot A_{Y3} - \frac{\operatorname{Re} \Delta L^2}{\Delta H_0} \cdot W_{i,j}^* \right), \quad (20)$$

де  $P_w = 1 / \left( A_{X2} + A_{Y2} - \frac{\operatorname{Re} \Delta L^2}{\Delta H_0} \right)$ .

Коефіцієнти формули (20) розраховуються по залежностях (21), (22).

$$A_{X1} = \frac{U \cdot \operatorname{Re} \Delta L \cdot (C_2 - C_1)}{(C_2 - 2 \cdot C_1)}, \quad A_{X2} = -\frac{U \cdot \operatorname{Re} \Delta L \cdot C_2}{(C_2 - 2 \cdot C_1)}, \quad A_{X3} = \frac{U \cdot \operatorname{Re} \Delta L \cdot C_1}{(C_2 - 2 \cdot C_1)}, \quad (21)$$

де  $C_1 = \exp(U \cdot \operatorname{Re} \Delta L) - 1$ ,  $C_2 = \exp(2 \cdot U \cdot \operatorname{Re} \Delta L) - 1$ .

$$A_{Y1} = \frac{V \cdot \operatorname{Re} \Delta L \cdot (C_2 - C_1)}{(C_2 - 2 \cdot C_1)}, \quad A_{Y2} = -\frac{V \cdot \operatorname{Re} \Delta L \cdot C_2}{(C_2 - 2 \cdot C_1)}, \quad A_{Y3} = \frac{V \cdot \operatorname{Re} \Delta L \cdot C_1}{(C_2 - 2 \cdot C_1)}, \quad (22)$$

де  $C_1 = \exp(V \cdot \operatorname{Re} \Delta L) - 1$ ,  $C_2 = \exp(2 \cdot V \cdot \operatorname{Re} \Delta L) - 1$ .

**Апроксимація крайових умов.** Найбільш складно крайові умови визначаються для рівняння (10) згідно до (11).

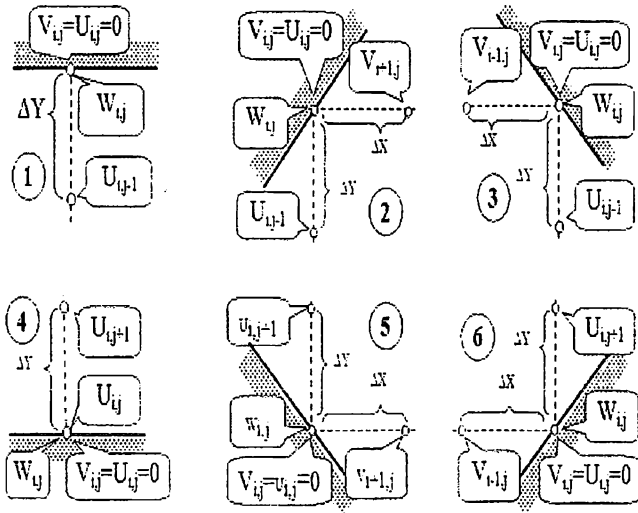


Рис. 3. Схема граничних умов для рівняння (11)

Розрахункові формули для границь каналу наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункові формули для граничних умов рис. 3

Номер	Розрахункова формула	Номер	Розрахункова формула
1	$W_{i,j} = -\frac{U_{i,j-1}}{\Delta Y}$	4	$W_{i,j} = \frac{U_{i,j+1}}{\Delta Y}$
2	$W_{i,j} = -\frac{U_{i,j-1}}{\Delta Y} - \frac{V_{i+1,j}}{\Delta X}$	5	$W_{i,j} = \frac{U_{i,j+1}}{\Delta Y} - \frac{V_{i-1,j}}{\Delta X}$
3	$W_{i,j} = -\frac{U_{i,j-1}}{\Delta Y} + \frac{V_{i-1,j}}{\Delta X}$	6	$W_{i,j} = \frac{U_{i,j+1}}{\Delta Y} + \frac{V_{i-1,j}}{\Delta X}$

Чисельна реалізація умов на вході в канал виконувалася у вигляді (23).

$$V_{0,j} = 0, \quad U_{0,j} = f_u(Y), \quad F_{0,j} = \int_0^{2L} f_u(Y) \cdot dY, \quad W_{0,j} = 0. \quad (23)$$

Чисельна реалізація умов на виході з каналу виконувалася у вигляді (24) згідно до рис. 4.

$$F_{ig,j} = 2 \cdot F_{ig-1,j} - F_{ig-2,j}, \quad W_{ig,j} = 2 \cdot W_{ig-1,j} - W_{ig-2,j} \quad (24)$$

де  $ig$  – індекс вузлів у вихідному перетині каналу.



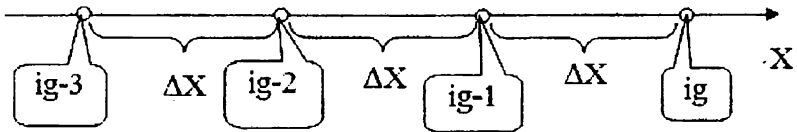


Рис. 4. Схема реалізації граничних умов на виході

Розрахунок проводиться по моментах часу. На кожному моменті часу  $n$  виконуються ітерації по швидкості рішень відносно  $F$  і  $W$ . Коли ітераційний процес зійшовся, за результатами рішення відносно полів  $U$ ,  $V$  виконується підготовка значень для  $n+1$  моменту часу. Загальний алгоритм програми розрахунку представлений на рис. 5.

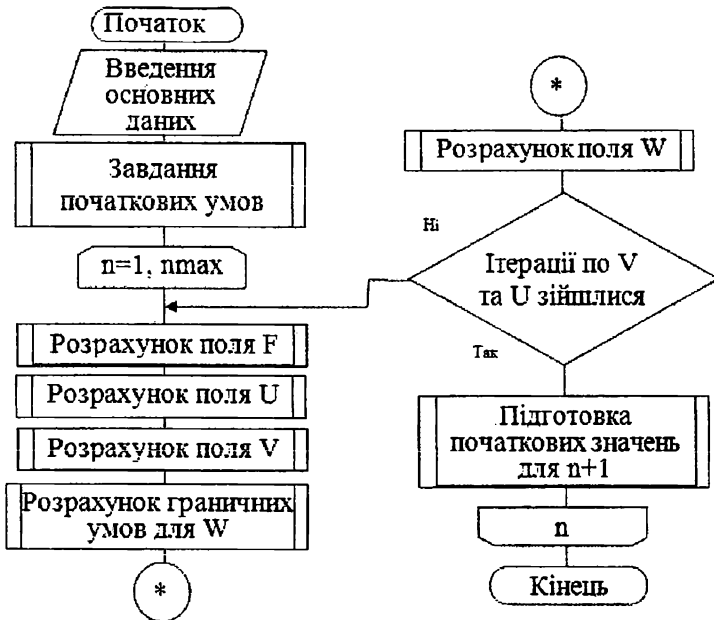


Рис. 5. Блок-схема алгоритму

Оскільки завдання абсолютних ітераційних допусків відносно  $F$  і  $W$  представляло певні труднощі, оцінка закінчення ітераційного процесу проводилася за значеннями швидкостей  $U$  і  $V$ , для яких задати абсолютний ітераційний допуск простіше.

**Результати досліджень.** Проводились варіантні дослідження по вивченню полів швидкостей повітря в каналах виду рис. 1.

Розглянута методика застосовувалася для дослідження поля швидкості повітря в каналах за протиточною схемою руху повітря рис. 6.

Режими течії були переважно ламінарні. Досліджувався також поля швидкості в каналі при виході на перехідні режими рис. 7.

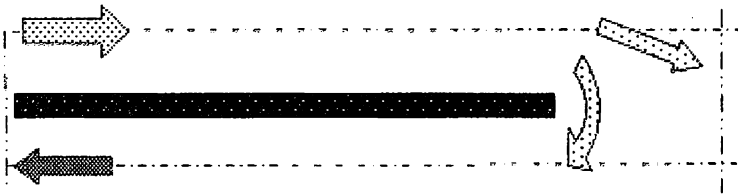


Рис. 6. Схема обтікання пластини

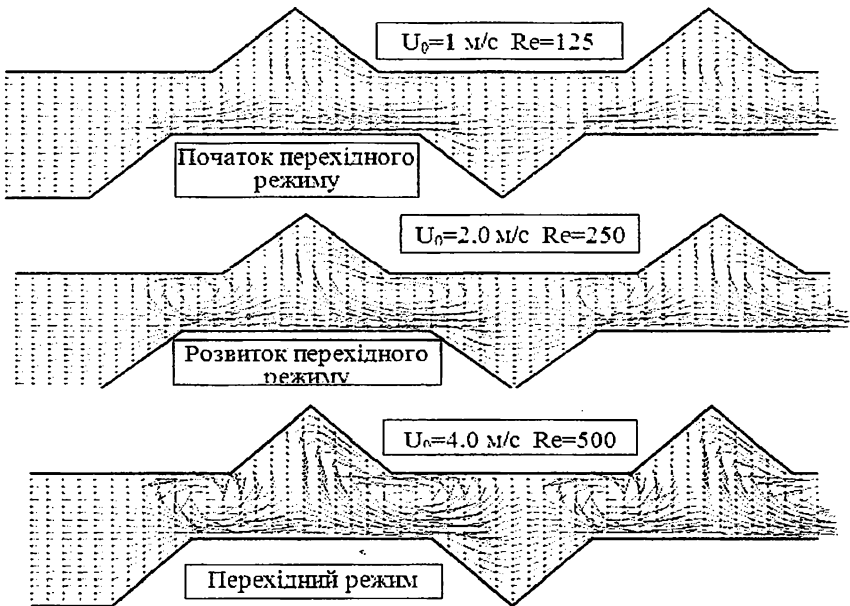


Рис. 7. Поля швидкості при різних режимах плин

Поле швидкості повітря при поділі потоків, як показано на рис. 7, наведено на рис. 8.

Описана методика застосовувалася для уточнення розподілу потоків повітря і процесів теплообміну при моделюванні режимів роботи охолоджувачів повітря побічно-випарного типу [12]. Спостерігалось хороше узгодження результатів математичного і натурального експериментів.

**Висновки.** Розроблена методика математичного моделювання процесів течії середовищ в теплообмінниках щільного типу дозволяє проводити детальні дослідження полів швидкості. Вона може застосовуватися при математичному моделюванні різних теплообмінних пристроїв при оптимізації режимів їх роботи.

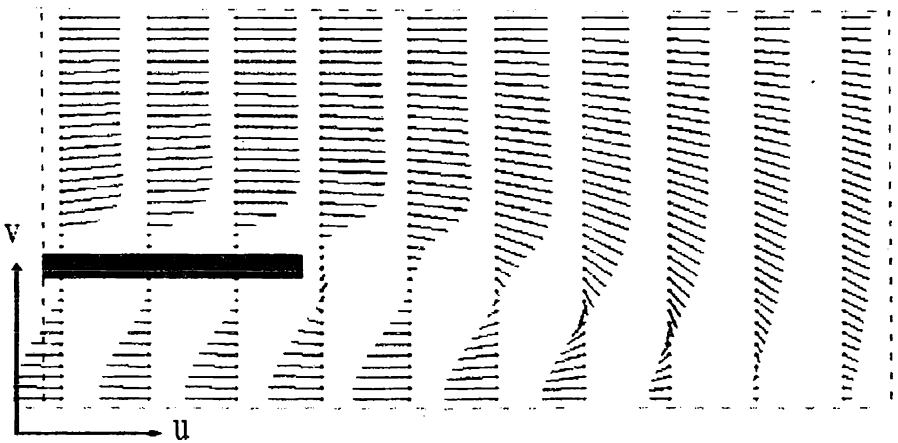


Рис. 8. Поле швидкості повітря при поділі потоків

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: ИММРАН, 2000. – 409 с.
2. Роуч П. Вычислительная гидромеханика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
3. Самарский А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А.А. Самарский, Ю.П. Попов. – М.: Наука, 1992. – 423 с.
4. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина: Пер. с англ. / К. Флетчер. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. Андерсен Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Пер. с англ. / Д. Андерсен, Дж. Таннехилл, Р. Глетчер. – М.: Мир, 1990. – Т.1. – 384 с.
7. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости. В 2-х т. / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – Т.1. – 502 с.
8. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С.В. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
9. Меркт Р.В. Устойчивая разностная схема для решения задач гидромеханики и конвективного переноса / Р.В. Меркт, В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи // Тезисы докладов 1 международной конференции «Численные методы в гидравлике и гидромеханике». – Донецк: ДонГУ, 1994. – С. 83.

10. Merkt R.V. Computer simulation of associated transfer processes / R.V. Merkt, V.V. Chelabchy // Вестник Национального технического университета «ХПИ»: Сб. научн. трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: ХПИ, 2004. – № 2. – С. 37-47.
11. Дорошенко А.В. Новое поколение систем кондиционирования воздуха на основе комбинированных испарительных охладителей / А.В. Дорошенко, В.Х. Кириллов, О.В. Ефимова, А.А. Климчук // Холодильная техника и технология. – 2000. – № 67. – С. 57-68.
12. Merkt R.V., Chelabchi V.N., Chelabchi V.V. Economical coolers of air of the evaporated type // Сб. научн. трудов Sword. – Вып. 3(36). – Т. 3. – Иваново: МАРКОВА АД, 2014. – С. 91-93.

*Стаття надійшла до редакції 15.11.2017*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, віце-президент Асоціації українського сейсмостійкого будівництва **К.В. Єгупов**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Л.С. Вітюк**

УДК 532+681.3

Т.Д. Панченко, В.І. Стародуб, В.В. Челабчі, В.М. Челабчі

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ  
ПРИ ЗГЛАДЖУВАННІ ЧАСОВИХ РЯДІВ**

*У статті описана методика згладжування експериментальних залежностей з високим рівнем шуму. Використовується метод ковзаючих відрізків. Залежності на ковзаючих відрізках описуються поліномами невисоких мір. Передбачена додаткова обробка залежності на початковому і кінцевому ділянках області визначення залежності. Вироблені критерії оцінки результатів згладжування. Розроблений алгоритм управління процесом згладжування дозволяє досягти заданих оцінок згладжування. Відзначається інваріантність методики до виду залежності і до рівня шуму.*

**Ключові слова:** зашумлена інформація, алгоритм, згладжування, ковзаючі відрізки, критерії оцінки результатів.

*В статті описана методика сглаживания экспериментальных зависимостей с высоким уровнем шума. Используется метод скользящих отрезков. Зависимости на скользящих отрезках описываются полиномами невысоких степеней. Предусмотрена дополнительная обработка зависимости на начальном и конечном участках области определения зависимости. Выработаны критерии оценки результатов сглаживания. Разработанный алгоритм управления процессом сглаживания позволяет достичь заданных оценок сглаживания. Отмечается инвариантность методики к виду зависимости и к уровню шума.*

**Ключевые слова:** зашумленная информация, алгоритм, сглаживание, скользящие отрезки, критерии оценки результатов.

*The technique of smoothing experimental dependences with a high noise level is described in the article. The method of sliding segments is used. Dependences on sliding segments are described by polynomials of low degrees. There is an additional treatment of the dependence on the initial and final sections of the domain of dependence. Criteria for estimating the results of smoothing are developed. The developed algorithm for controlling the smoothing process, which allows you to achieve a given estimation of smoothing. The method is invariant to the form of dependence and to the noise level.*

**Keywords:** noisy information, algorithm, smoothing, sliding segments, criteria for evaluating the results.

**Вступ.** Вирішення будь-якої технічної задачі, що пов'язана з обробкою цифрових даних (сигналу) незалежно від їх природи, починається з виділення корисної інформації (інформативних ознак). Як правило, вихідна інформація надається нам с деякою похибкою. Випадкові похибки (шуми) при цьому необхідно погасити тим чи іншим фільтром. Далі, при вирішенні конкретних задач інформація, очищена від перешкод, використовується у практиці.

Якщо природа перешкод відома, то будуються цифрові фільтри, що реагують саме на такі перешкоди. Якщо ж природа перешкод не відома, тобто коли на інформативний сигнал накладений «білий шум», то використовують різноманітні апарати згладжування, які убирають різкі зміни вхідної інформації.

Як правило, експериментальні дані зашумлені. Для отримання ясної картини досліджуваного процесу потрібно знизити вплив шуму. У практиці обробки експериментальних даних апроксимація зашумлених даних не завжди проводиться успішно. Особливо, якщо істотною є інформація про першу і особливо другу похідні.

**Аналіз основних публікацій з проблеми.** У літературі описано безліч методів згладжування, в числі яких метод поліномів Чебишева, метод рядів Фур'є, метод змінного середнього, метод четвертих різниць, експоненціальне згладжування [1; 3]. Часто використовуються методи сплайнової апроксимації [4]. Проводяться розробки в області адаптивного згладжування шумів [4; 5].

У практиці обробки експериментальних даних апроксимація зашумлених даних не завжди проводиться успішно. Особливо, коли необхідна достовірна інформація про значення першої й особливо другої похідної. При апроксимації рядів експериментальних даних сплайнами так само існують певні сумніви у вірогідності визначення похідних.

Можливий інший шлях, коли в процесі згладжування розраховуються значення не тільки згладженої функції але і її похідних [6; 7].

**Постановка задачі.** Основні вимоги до розробки методів згладжування:

- слабка чутливість до характеру і рівня зашумлення залежностей;
- інваріантність до типу фізичних процесів в об'єктах;
- забезпечення високої міри достовірності результатів згладжування.

При тестуванні оцінку результатів згладжування має сенс проводити шляхом порівняння аналітичних залежностей  $Y_a(\tau)$  з результатами згладжування  $Y_v(\tau)$ . Імітація зашумлених залежностей  $Y_e(\tau)$  проводиться згідно до

$$Y_e(\tau) = Y_a(\tau) + \Delta sh,$$

де  $\Delta sh$  – заданий шум. При тестуванні розглядалися різні варіанти генерації шуму.

Варіант 1. ( $Kodf = 0$ ) Смуга шуму при постійному відносному значенні ширини смуги. Центр смуги шуму  $\Delta sh$  збігається з кривою аналітичного рішення. Величина зашумленого значення  $Ye$  визначається по залежності (1)

$$Ye = Ya + Dsh \cdot (0.5 - Clч) \cdot (Y_{max} - Y_{min}). \quad (1)$$

Варіант 2. ( $Kodf = 1$ ) Смуга шуму у вигляді гармонійного коливання з високою частотою. Центр смуги шуму  $\Delta sh$  збігається з кривою аналітичного рішення. Величина зашумленого значення  $Ye$  визначається по залежності (2)

$$Ye = Ya + Dshf/2 \cdot \sin(Fric \cdot \tau) \cdot (Y_{max} - Y_{min}). \quad (2)$$

Варіант 3. ( $Kodf = 2$ ) Смуга шуму у вигляді гармонійного коливання з високою частотою і випадковою зміною амплітуди коливань. Центр смуги шуму  $\Delta sh$  збігається з кривою аналітичного рішення. Величина зашумленого значення  $Ysh$  визначається по залежності (3)

$$Ye = Ya + Dshf/2 \cdot (0.5 - Clч) \cdot \sin(Fric \cdot \tau) \cdot (Y_{max} - Y_{min}), \quad (3)$$

де  $Y_{max}$ ,  $Y_{min}$  – відповідно максимальне і мінімальне значення, отримані при аналітичному рішенні;

$Ya$  – аналітичне рішення;

$Dsh$  – відносно значення величини смуги шуму;

$Dshf/2$  – відносно значення амплітуди коливань;

$Fric$  – частота гармонійних коливань;

$Clч$  – випадкове число в діапазоні 0-1 при рівномірному розподілі.

**Розробка методу згладжування.** Доречно використовувати згладжування зашумлених часових рядів  $Ye$  ( $\tau$ ), використовуючи апроксимацію на ковзних відрізках [6]. Схема розташування вузлів (моментів часу) приводиться на рис. 1.

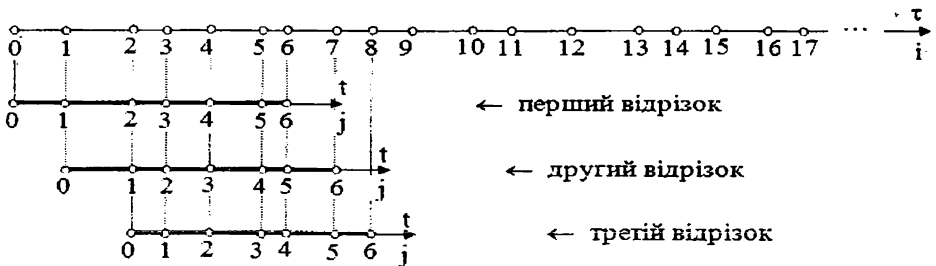


Рис. 1. Схема розбивки області визначення функції на відрізки

На кожному виділеному відрізку часу використовується локальна, в межах кожного відрізка, незалежна змінна  $t$ ,  $\tau$  – глобальний час. Залежність  $Ye(t)$  у межах кожного відрізка апроксимується поліномом невисокого ступеня. Апроксимація функції  $Y$  на відрізках здійснюється методом найменших квадратів.

Обраний спосіб подання даних для проведення апроксимації експериментальних залежностей  $Y(\tau)$  відрізняється тим, що він не вимагає рівномірного розташування моментів часу на осі  $\tau$ .

Обчислюються значення апроксимуючої функції  $Ya$  і її похідних для кожного значення аргументу відрізка (4)

$$Ya(t) = \sum_{k=0}^{K_{pol}} a_k \cdot t^k, \quad Ya'(t) = \sum_{k=1}^{K_{pol}} k \cdot a_k \cdot t^{k-1}, \quad Ya''(t) = \sum_{k=2}^{K_{pol}} (k-1) \cdot k \cdot a_k \cdot t^{k-2}, \quad (4)$$

де  $K_{pol}$  – порядок апроксимуючого полінома.

Таким чином, значення  $Y$ ,  $Y'$ ,  $Y''$  для кожного  $i$ -го значення аргументу обробляються багаторазово. Згладжені значення  $Y_v$ ,  $Y_v'$ ,  $Y_v''$  для кожного значення  $\tau_i$  розраховуються по формулах (5)

$$Y_v = \frac{1}{km} \cdot \sum_{k=1}^{km} Ya_k, \quad Y_v' = \frac{1}{km} \cdot \sum_{k=1}^{km} Ya'_k, \quad Y_v'' = \frac{1}{km} \cdot \sum_{k=1}^{km} Ya''_k, \quad (5)$$

де  $km$  – кількість обробок значень  $Ya$ .

Початкова й кінцева частини області визначення функції  $Ye(\tau)$  обробляються недостатньо, що веде до зниження якості згладжування в цих районах. Тому обробка зазначених областей проводиться додатково [7] (рис. 2).

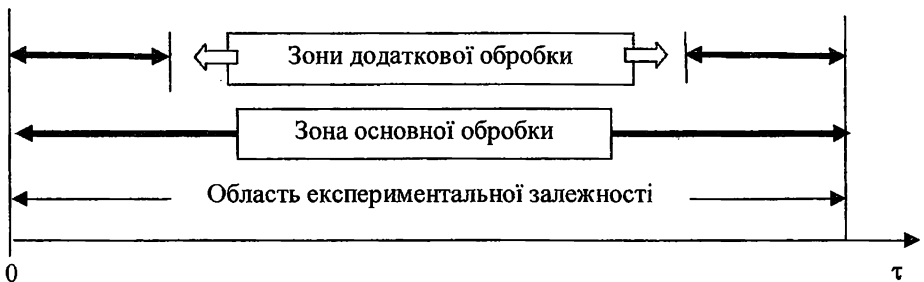


Рис. 2. Зони обробки даних



При розробці алгоритмів і програм згладжування різних залежностей використані позначення: аргумент  $X$ , а функція  $Y$ . Коли використовуються розроблені програми для згладжування часових рядів в якості аргументу вводяться значення моментів часу  $\tau$ . Основний алгоритм згладжування залежності виду  $Y = f(X)$  (процедура Smoo) представлений блок-схемою на рис. 3, де використані позначення (таблиця 1).

Таблиця 1

Основні параметри процедури Smoo

Ім'я в процедурі	Ім'я в тексті	Назва
Im	$Im$	Кількість значень на осі аргументу $X$
Kpol	$K_{pol}$	Ступінь апроксимуючого полінома
Jm	$J_m$	Кількість вузлів на відрізку апроксимації
Xe	$X_e$	Вихідне (зашумлене) значення аргументу $X$
Ye	$Y_e$	Вихідне (зашумлене) значення функції $Y$
R2Ymin	$R^2_{min}$	Мінімальне на відрізку значення оцінки $R^2$
Yv	$Y_{it}$	Відновлене (згладжене) значення $Y$
dY/dt	$Y_{v'}$	Відновлене значення першої похідної
d2Y/dt2	$Y_{v''}$	Відновлене значення другої похідної

В процедурі Smoo використана процедура Arg, яка призначена для апроксимування залежності методом найменших квадратів (рис. 4).

Для підвищення якості згладжування можна проводити повторне згладжування, коли в якості вихідних даних використовуються результати попереднього згладжування. Результати досліджень представлені на рис. 5-7 при  $\Delta sh = 10\%$  від максимальної зміни значення  $Y_a$ .

Відносні похибки згладжування  $\delta Y$ ,  $\delta Y'$ ,  $\delta Y''$  обчислюються щодо максимальної зміни відповідної величини в області згладжування.

Управляти згладжуванням можна кількістю значень аргументу на ковзному відрізку ( $J_m$ ) і ступенем апроксимуючого полінома ( $K_{pol}$ ).

Для вибору оптимальних умов згладжування проводиться варіювання значень  $J_m$  і  $K_{pol}$ . Оптимальними вважаються значення  $J_m$  і  $K_{pol}$  для яких мінімальне значення оцінки  $R^2$  (6) по всіх оброблюваних відрізках  $R^2 Y_{min}$  максимально близька до одиниці.

$$R^2 Y = 1 - \left( \sum_{i=0}^{Im} (Y_{sh_i} - Y_{v_i})^2 \right) / \left( \sum_{i=0}^{Im} Y_{sh_i}^2 - \left( \sum_{i=0}^{Im} Y_{sh_i} \right)^2 / (Im + 1) \right), \quad (6)$$

де  $Y_{sh}$ ,  $Y_v$  – відповідно, зашумлені й відновлені безрозмірні значення  $Y$ ;  
 $i$  – індекс моменту часу на осі  $\tau$ .

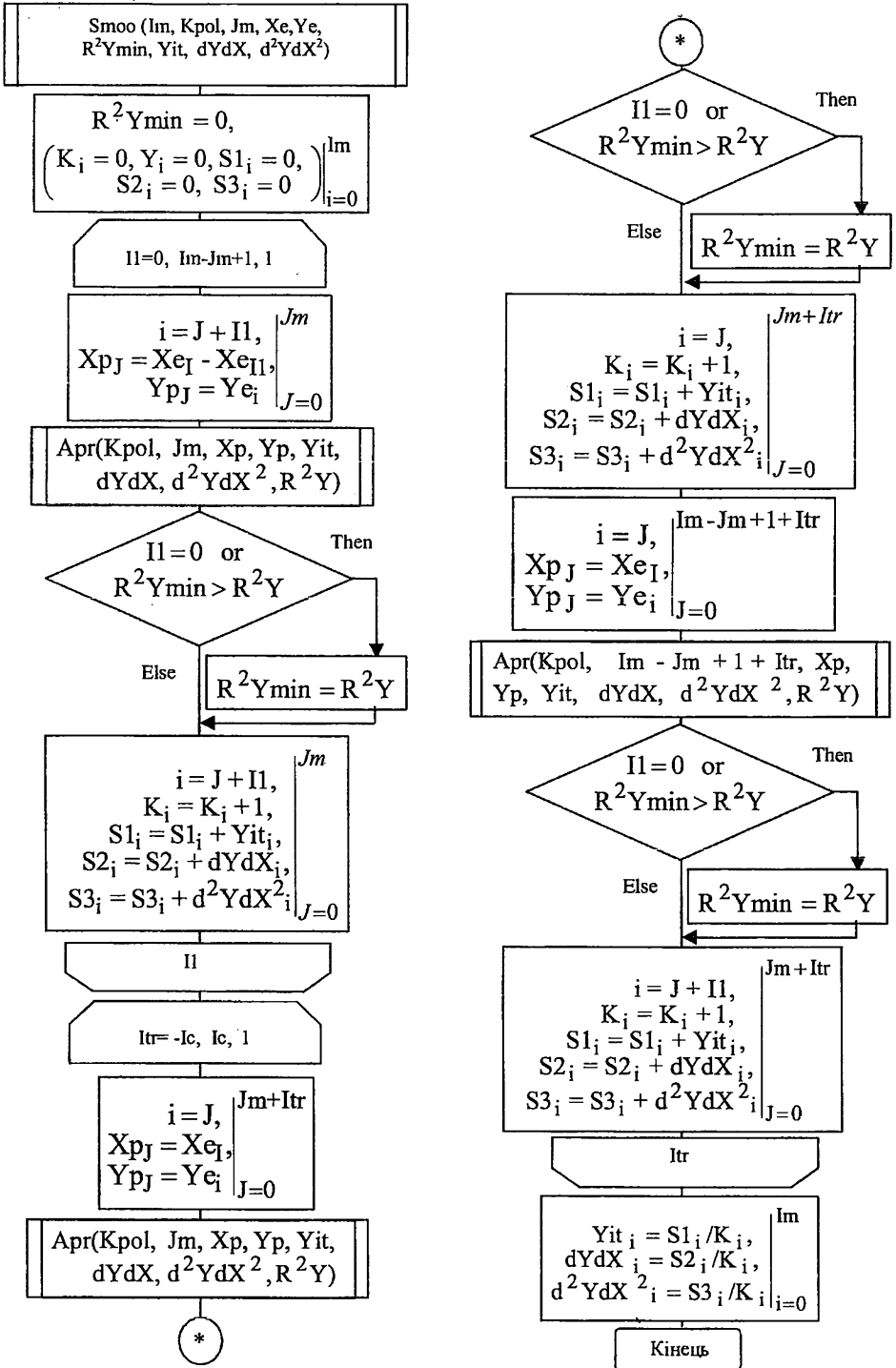
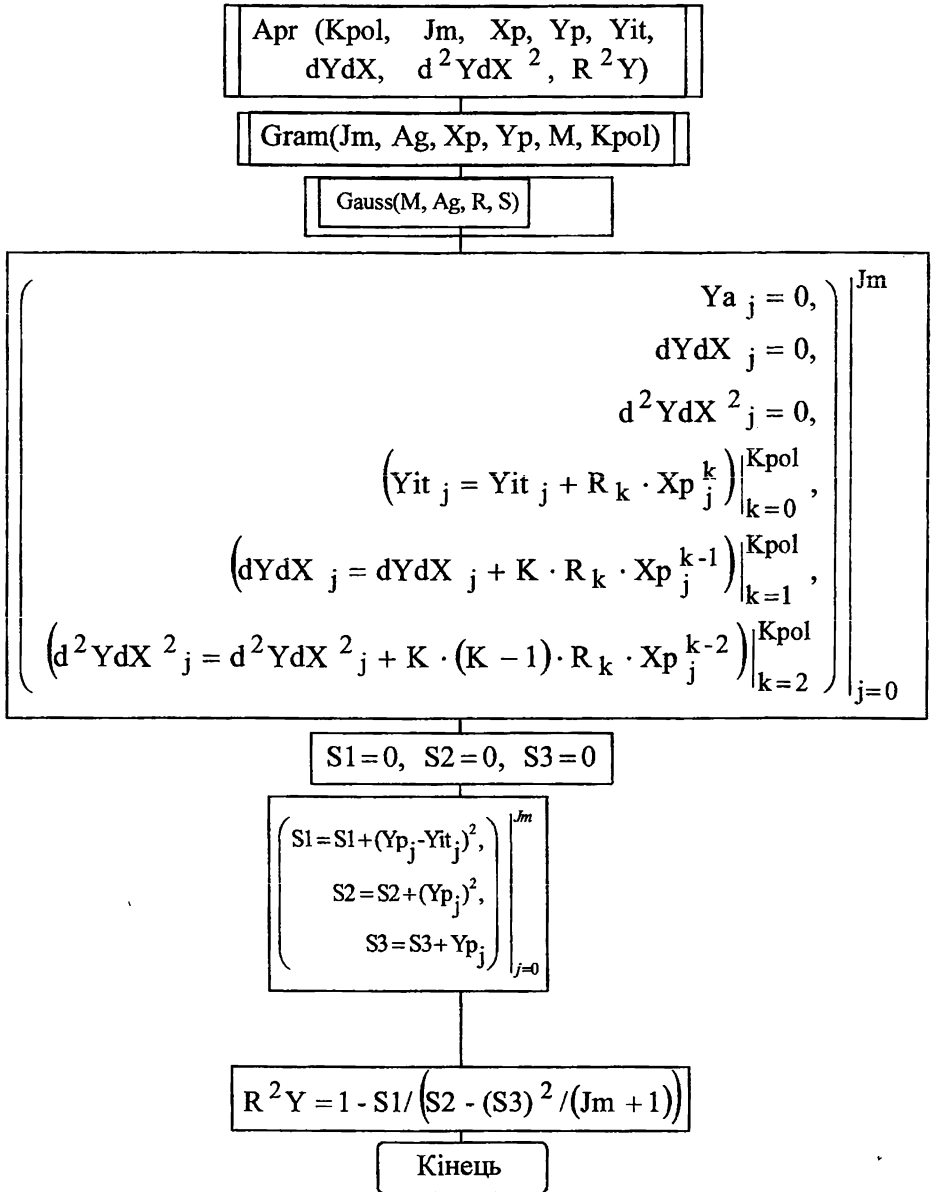


Рис. 3. Основний алгоритм згладжування



*Рис. 4. Блок-схема процедури Apr*

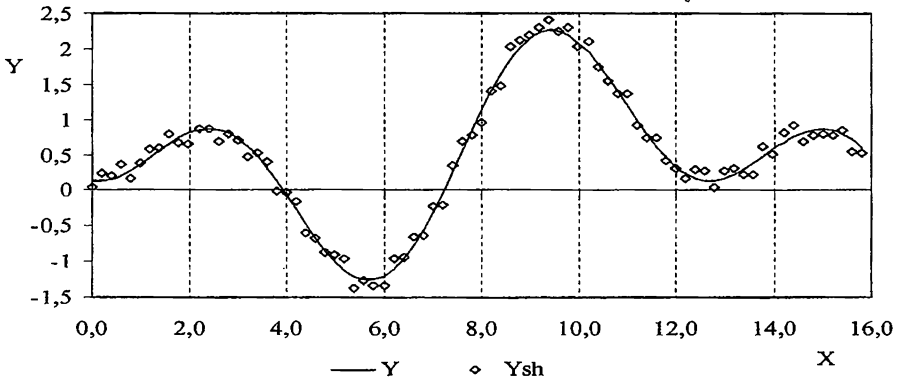


Рис. 5. Формування зашумленої залежності

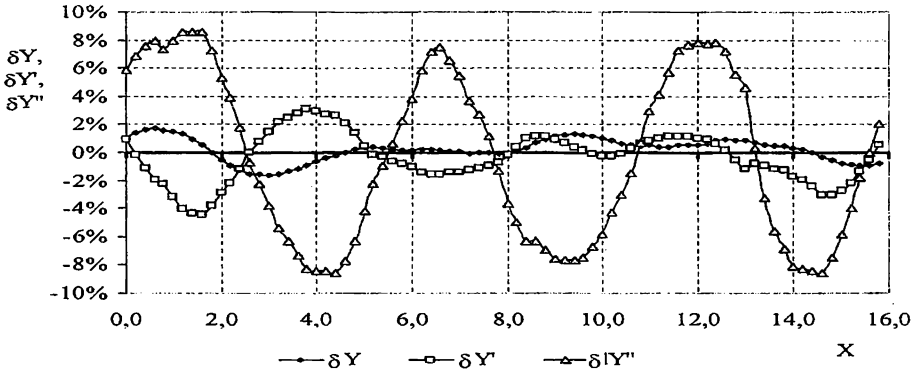


Рис. 6. Оцінка похибки при першому згладжуванні

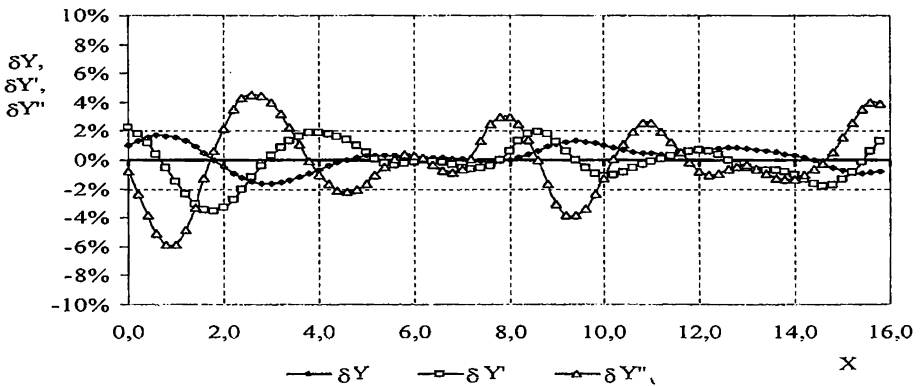


Рис. 7. Результати повторення згладжування

Для оперативного керування ітераційним процесом згладжування поряд з оцінкою (6) використовується середньоквадратична оцінка різниці рішень на двох сусідніх ітераціях (7).

$$\sigma_{it} = \sqrt{\left( \sum_{i=0}^{lm} (Yv_{i|Iter} - Yv_{i|Iter-1})^2 \right) / (lm + 1)}, \quad (7)$$

де  $Yv$  – значення функції, що отримане шляхом ітераційного згладжування;

$Iter$  – номер ітерації.

Для розширення діапазону значень величин і підвищення якості згладжування експериментальних залежностей використовується безрозмірне подання даних  $Ye \rightarrow Ysh$ .

$$Ysh_{i} = \left( \frac{Ye_{i}}{Ysh_{\max} - Ysh_{\min}} \right) \Bigg|_{i=0}^{lm}, \quad (8)$$

де  $Ysh_{\max} = \max (Ysh_{i|_{i=0}}^{lm})$ ,  $Ysh_{\min} = \min (Ysh_{i|_{i=0}}^{lm})$ .

При виконанні процедури  $Smoo$  обробляється вся область представлення  $Ysh_i$ , додатково, ділянки на початку і кінці області. При цьому, для кожного відрізка апроксимації визначається оцінка узгодження значень апроксимаційних і заданих змінних ( $R^2$ ).

Завершення ітераційного процесу здійснюється за умовою (9).

$$1 \geq R^2 \min > R^2 Y \text{ и } \sigma_{it} < \sigma_0, \quad (9)$$

де  $R^2 Y \min$ ,  $kn$ ,  $\sigma_0$  – параметри керування;

$R^2$ ,  $R^2 \min$ ,  $\sigma_{it}$  – поточне значення параметрів.

Алгоритм керованого згладжування представлений на рис. 8.

**Тестування методу.** Для вибору надійних значень параметрів управління були проведені дослідження для ряду залежностей, коли вид залежності та рівень шуму варіювалися в широких діапазонах. Як показали дослідження, має сенс призначити:  $R^2 Y \min = 0,985-0,99$ ,  $\sigma_0 = 0,01$ ,  $kn = 5-7$ .

Для оцінки ефективності розробленої методики проводилася ідентифікації рівняння (10) з використанням дуже зашумлених експериментальних даних

$$C_2 \cdot \frac{d^2 Y}{d\tau^2} + C_1 \cdot \frac{dY}{d\tau} + Y = K_1 \cdot X, \quad (10)$$

де  $\tau$  – час;

$X(\tau)$  – дія;

$Y(\tau)$  – реакція об'єкту;

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $K_1$  – коефіцієнти властивості об'єкту.

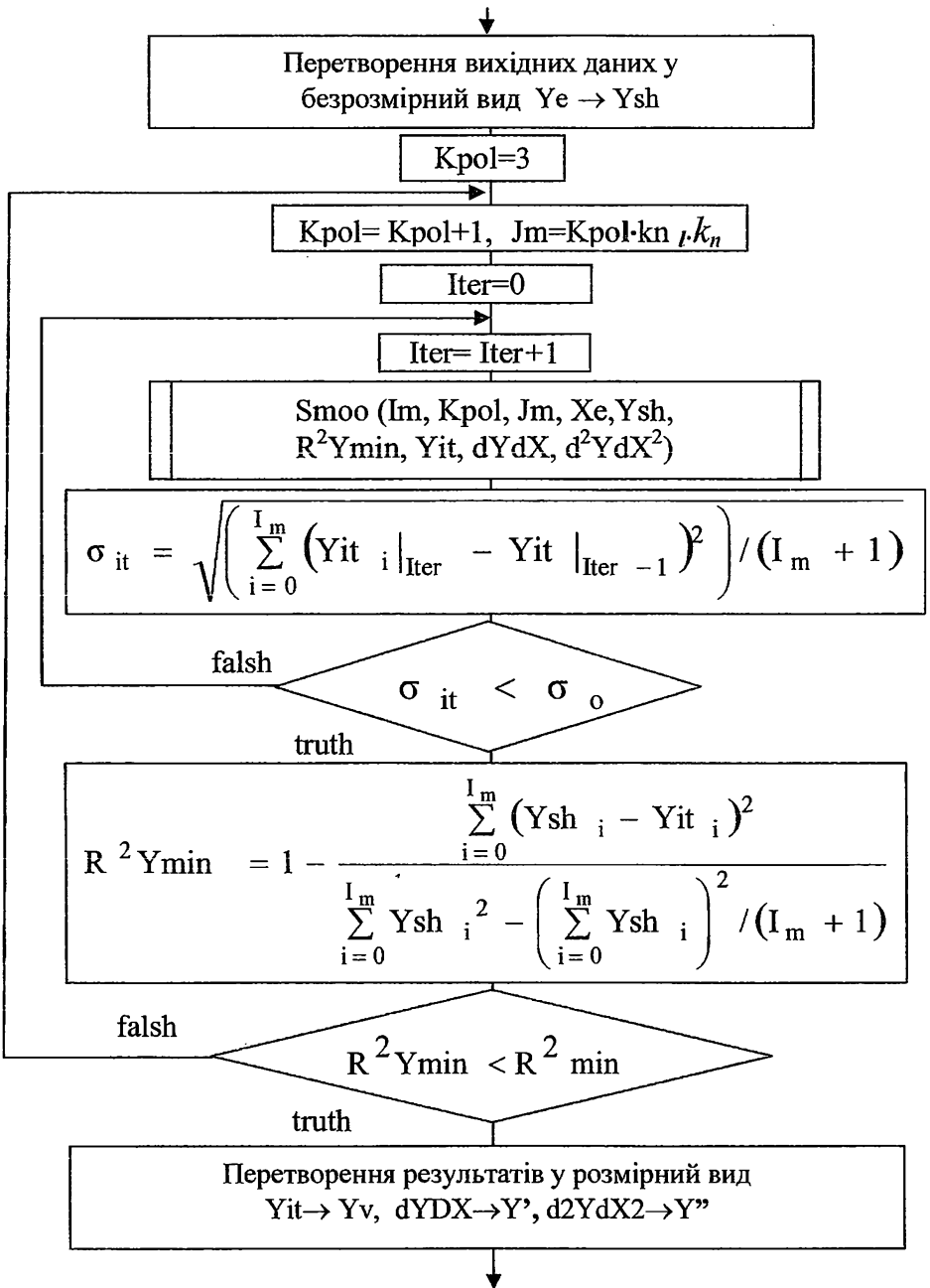


Рис. 8. Схема алгоритму керованого згладжування

Найчастіше, ідентифікація моделей динамічних об'єктів проводиться з апроксимацією зашумлених даних на ковзаючих відрізках [8; 10]. В даному випадку використаний інший підхід [11]. Заздалегідь проводиться згладжування експериментальних часових рядів в усій області представлення зашумлених залежностей  $X = (\tau)$  та  $Y(\tau)$ . Для ідентифікації рівняння (10) використовувався алгоритм, представлений на рис. 9.

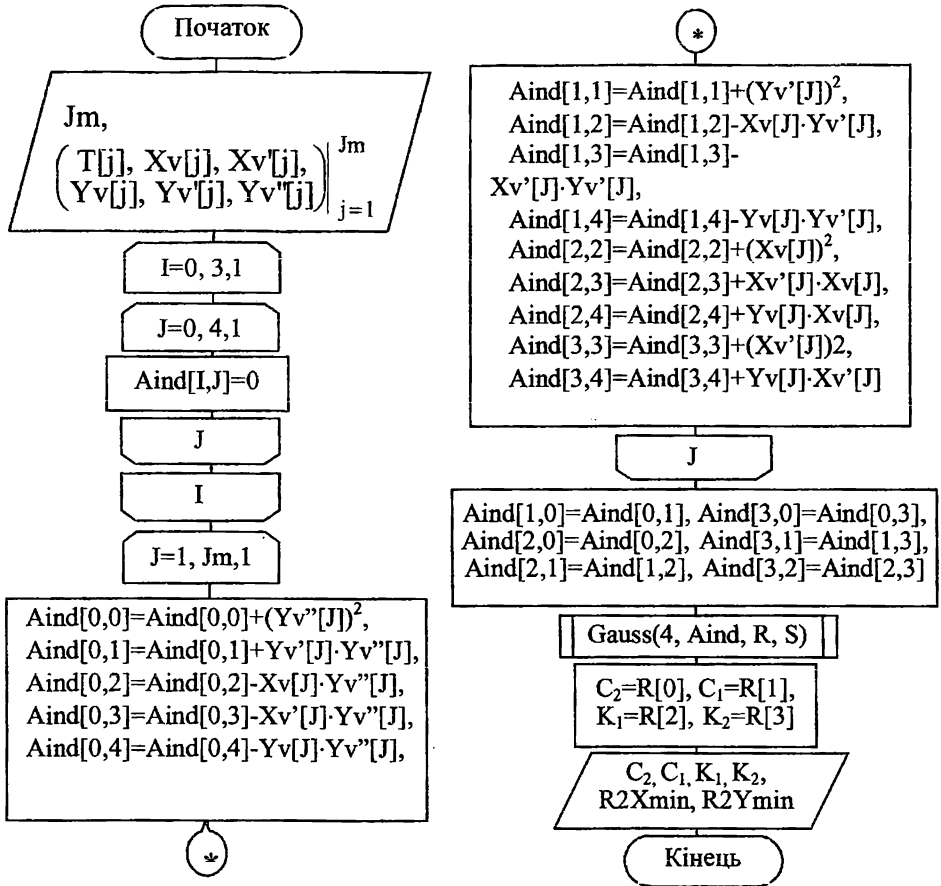
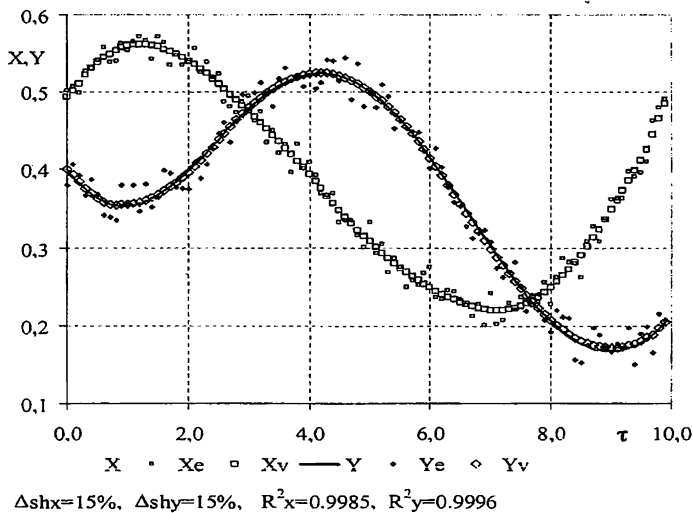


Рис. 9. Блок-схема процесу ідентифікації рівняння (10)

Використовувалися зашумлені аналітичні рішення рівняння (10).

Приймалося, що відхилення зашумлених даних від аналітичного рішення задовольняють рівномірному розподілу. Величини смуг шуму  $\Delta shx$  і  $\Delta shy$  задавалися на рівні 15 % від максимальних змін аналітичних значень відповідно  $X$  та  $Y$ .

На рис. 10 суцільними лініями відображені графіки зміни в часі величини дії  $X$  і аналітичного рішення  $Y$ . Зашумлені дані ( $X_e$  і  $Y_e$ ) та згладжені ( $X_v$  і  $Y_v$ ) відображені маркерами.



*Рис. 10. Залежність аналітичних, імітованих (зашумлених) і згладжених залежностей впливу і реакції об'єкта від часу*

Для оцінки достовірності рішення задачі ідентифікації було одержане аналітичне рішення (10) за тих же початкових умов, але з використанням відновлених значень  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $K_1$ . Результати наведені в таблиці 2.

*Таблиця 2*

*Результати ідентифікації*

Параметр	Прийнято	Результат	Похибка, %
$C_1$	2.0	1.93	3.4
$C_2$	1.0	1.029	2.9
$K_1$	1.0	1.006	0.53

**Висновки.** Розроблено метод згладжування різного виду зашумлених експериментальних залежностей. Метод орієнтовано, в першу чергу, на обробку часових рядів.

Особливості методу:

- слабка чутливість до характеру і рівню зашумлення залежностей;
- інваріантність до типу фізичних процесів в об'єктах;
- метод не вимагає рівномірного розташування значень моментів часу на осі аргументу;
- метод забезпечує високу міру достовірності результатів згладжування.

Розроблено метод ідентифікації моделей динаміки об'єктів з попереднім згладжуванням експериментальних (зашумлених) часових рядів.



### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: Специальный справочник / И. Гайдышев. – СПб.: Питер, 2001. – 752 с.
2. Ruey-Chyn Tsaur. Further Examination to Fuzzy Exponential Smoothing Model / Ruey-Chyn Tsaur // *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. – 2005. – Vol. 22. – № 6.
3. Кондрашова Н.В. Сравнительный анализ методов сглаживания и МГУА для прогнозирования временных рядов / Н.В. Кондрашова, Я.В. Павлов // *Індуктивне моделювання складних систем: Зб. наук. праць*. – К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2009. – Вып. 1. – С. 84-101.
4. Остропицкий В.М. Среднеквадратическое приближение параболических сплайн-регрессионных зависимостей / В.М. Остропицкий // *Вопросы прикладной математики и математического моделирования: Сб. научн. трудов*. – Д.: ДГУ, 1999. – С. 97-101.
5. Файзильберг Л.С. Адаптивное сглаживание шумов в информационных технологиях обработки физиологических сигналов / Л.С. Файзильберг // *Математические машины и системы*. – 2002. – № 3. – С. 96-104.
6. Меркт Р.В. Особенности сглаживания экспериментальных зависимостей методом скользящих отрезков / Р.В. Меркт, В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи // *Сб. научн. трудов Sword. Физика и математика*. – Одесса: Черноморье, 2011. – Т. 8. – С. 18-22.
7. Chelabchi V.N. Smoothing out of experimental dependences / V.N. Chelabchi, V.V. Chelabchi // *Сб. научн. трудов Sword*. – Иваново: МАРКОВА АД, 2013. – Вып. 4. – Т. 5. – С. 47-51.
8. Челабчи В.В. К вопросу параметрической идентификации элементов динамических систем с запаздыванием / В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи // *Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Передові наукові розробки-2006»*. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – Т. 5. – С. 71-73.
9. Челабчи В.В. Управляемая идентификация моделей динамических систем / В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи // *Materialy IX Megdynarodowej naukovowi-praktycznej konferencij. «Perspektywiczne opracowania sa nauka I technikami-2013»*. *Matematyka*. – Przemysl: Nauka i studia, 2013. – Vol. 33. – С. 47-51.
10. Меркт Р.В. Обчислювальний експеримент. Динаміка систем / Р.В. Меркт, В.В. Челабчі, В.Н. Челабчі, І.А. Кукишев // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*. – Одеса: ОНМУ, 2014. – № 1(40). – С. 214-227.

11. Челабчи В.В. К вопросу идентификации динамических объектов / В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи // Вторая Международная научно-практическая конференция «Спецпроект: анализ научных исследований»: Сб. научн. работ. – Т. 3. – Днепропетровск: НАЦ «ЕРА», 2005. – С. 52-55.

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2017*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, віце-президент Асоціації українського сейсмостійкого будівництва **К.В. Єгупов**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Л.С. Вітюк**

УДК 629.5.015.4:539.431

Д.Ю. Литвиненко

**МЕТОДИКИ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ  
СУДНОКОРПУСНИХ ВУЗЛІВ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ  
НА БАЗІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНОГО МЕТОДУ**

*Розроблені методики розв'язку наступних задач: оцінки втомної міцності суднокорпусного вузла; визначення допустимого коефіцієнта концентрації напружень за умови забезпечення втомної міцності суднокорпусного вузла; визначення допустимого параметру зовнішнього навантаження на вузол. Для випадку навантаження регулярного характеру розв'язок перелічених задач оснований на базовому варіанті експериментально-теоретичного методу розрахунку втомної міцності, а для стохастичного – на удосконаленому варіанті методу.*

**Ключові слова:** корпус судна, практичні методики, зварний вузол, втомна міцність, коефіцієнт концентрації напружень, допустиме навантаження.

*Разработаны методики решения следующих задач: оценки усталостной прочности суднокорпусного узла, определения допустимого коэффициента концентрации напряжений из условия обеспечения усталостной прочности суднокорпусного узла, определения допустимого параметра внешней нагрузки на узел. Для случая нагружения регулярного характера решение перечисленных задач основано на базовом варианте экспериментально-теоретического метода расчета усталостной прочности, для стохастического – на усовершенствованном варианте метода.*

**Ключевые слова:** корпус судна, практические методики, сварной узел, усталостная прочность, коэффициент концентрации напряжений, допустимое нагружение.

*The methodology of the fatigue strength assessment has been developed. Methodologies of solving the problems of the determination of the allowable stress concentration factors and allowable external load on the basis of fatigue strength provision condition have been developed. The basic version of the experimental and theoretic method is assumed to be used for the case of regular loading condition. Improved version of the experimental and theoretic method is assumed to be used for the case of stochastic loading condition.*

**Keywords:** ship hull, practical methodologies, welded assembly, fatigue strength, stress concentration factor, allowable load.

**Вступ.** Корпус судна традиційно проектується з урахуванням максимальних навантажень в умовах експлуатації. Зростання важливості забезпечення втомної міцності суднокорпусних конструкцій останнім часом обумовлено такими факторами: зменшення товщин конструкцій через застосування програмних комплексів скінченно-елементного аналізу, поширення використання сталей підвищеної міцності, зростання відношення потужності енергетичної установки до маси суден.

Як зазначалось у роботі [1], на практиці необхідно розв'язувати наступні задачі втомної міцності суднокорпусних вузлів:

- задача визначення втомної міцності;
- задача визначення допустимого коефіцієнта концентрації напружень для суднокорпусного вузла з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності;
- задача визначення допустимого параметру зовнішнього навантаження на суднокорпусний вузол з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності.

У роботі [2] зазначено, що для розв'язку перелічених задач доцільно використовувати експериментально-теоретичний метод розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій, основні положення якого представлені в публікаціях [2-6]. У вказаних роботах описано базовий варіант методу, призначений для опису зародження втомної тріщини у суднокорпусних вузлах, які зазнають дії навантаження регулярного характеру. Для випадків дії на вузли нерегулярного навантаження слід застосовувати удосконалений варіант методу, описаний в роботі [7]. Цей варіант слід застосовувати у поєднанні з гіпотезою лінійного підсумовування втомних пошкоджень Пальмгрена-Майнера. Вказана гіпотеза у випадку представлення навантаження на вузол у ступінчастому форматі має наступний вигляд:

$$D = \sum_{j=1}^q n_j / N_j, \quad (1)$$

де  $D$  – величина міри втомного пошкодження;

$q$  – кількість ступенів (рівнів) навантаження;

$n_j$  – напрацьоване число циклів зовнішнього навантаження на його  $j$ -ій ступені;

$N_j$  – число циклів до зародження втомної тріщини при дії на досліджуваний вузол навантаження, що відповідає  $j$ -ій ступені. Досягнення величини  $D$  критичного рівня  $D_{кр}$  відповідає появі втомної тріщини у вузлі. Умовою забезпечення достатньої втомної міцності є  $D \leq D_{кр}$ . Величину  $D_{кр}$  зазвичай приймають на рівні одиниці.

У випадку, коли закон довготермінового розподілу зовнішнього навантаження на вузол задають неперервним, розрахунок величини  $D$  згідно до лінійної гіпотези підсумовування втомних пошкоджень виконується за формулою

$$D = N^* \int_{(\Delta\sigma_n)_{\min}}^{(\Delta\sigma_n)_{\max}} \frac{p(\Delta\sigma_n)}{N(\Delta\sigma_n)} d(\Delta\sigma_n), \quad (2)$$

де  $\Delta\sigma_n$  – розмах циклу номінальних напружень, Па;

$p(\Delta\sigma_n)$  – щільність імовірності розподілу величини  $\Delta\sigma_n$ ;

$N(\Delta\sigma_n)$  – залежність числа циклів до (або до появи тріщини втомі) від величини  $\Delta\sigma_n$ ;

$(\Delta\sigma_n)_{\min}$ ,  $(\Delta\sigma_n)_{\max}$  – мінімальний та максимальний розмахи номінальних напружень в діапазоні навантаження досліджуваного об'єкту, Па;

$N^*$  – число циклів навантаження за строк експлуатації.

Схеми розв'язку перелічених раніше задач втомної міцності для випадку навантаження регулярного характеру разом із прикладами їх застосування представлені в роботах [8-11].

Приклади розв'язку задачі розрахунку втомної міцності суднокорпусних вузлів при дії на них навантаження стохастичного характеру представлені, зокрема, в роботі [12]. Для розрахунку втомного пошкодження були використані методи напруження в «гарячій» точці, ефективного коефіцієнта концентрації напружень та деформаційний, які описані в публікації [2].

У роботі [13] виконувалось проектування, з умови забезпечення втомної міцності, ковзаючого з'єднання стінок надбудови корпусу судна, яке зазнає дії стохастичного хвильового навантаження. Проектування виконувалось шляхом дослідження втомної міцності п'яти конструктивних варіантів розглядуваного вузла.

В роботі [14] представлені результати розрахунків втомного пошкодження зварних вузлів корпусу балкера відповідно до рекомендацій різних класифікаційних товариств. Усі розрахунки у зазначених роботах виконувались з використанням гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень. Експериментально-теоретичний метод для розв'язку задач втомної міцності суднокорпусних вузлів при дії на останні навантаження стохастичного характеру не застосовувався. Необхідно розробити відповідні методики, при цьому потрібно вибрати найбільш прийнятний для інженерних розрахунків спосіб визначення параметрів стохастичного зовнішнього навантаження, а також вибрати спосіб визначення коефіцієнтів концентрації напружень для зварних вузлів.

**Мета роботи.** Розробка методик розв'язку задач втомної міцності суднокорпусних вузлів з використанням удосконаленого експериментально-теоретичного методу та гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень для випадку навантаження стохастичного характеру.

**Викладення основного матеріалу.** Процес розв'язку будь-якої задачі втомної міцності з використанням базового або удосконаленого для розрахунків при дії нерегулярного навантаження варіантів експериментально-теоретичного методу включає *етап підготовки вихідних даних*. Даний етап передбачає розрахунок теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень  $K_t$  та  $K_{\sigma}$ , відповідно, для досліджуваного вузла та його моделі, що випробовувалась на втому, а також визначення параметрів зовнішнього навантаження на вузол (якщо потрібно) та точки «прив'язки» до експериментальних даних.

*Визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень для досліджуваного вузла та його моделі.* Теоретичні коефіцієнти концентрації напружень  $K_t$  та  $K_{\sigma}$  для суднокорпусних вузлів можна визначати за допомогою систем комп'ютерного інженерного аналізу, розроблюючи «повну» комп'ютерну модель вузлів. Вона представляє детальну 2 або 3-вимірну модель, яка є максимально подібною до реального виробу, з урахуванням моделювання форми зварного шва в місці переходу від основного металу до металу шва. Менш трудомістким є використання спрощеного способу, викладеного в роботі [15]. Цей спосіб передбачає визначення величини  $K_t$  для суднокорпусного вузла добутком

$$K_t = K_g \cdot K_w, \quad (3)$$

де  $K_w$  – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, обумовлений наявністю зварного шва;

$K_g$  – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, обумовлений загальною геометрією вузла.

Величину  $K_g$  передбачається розраховувати за довідковими даними або з використанням програмних комплексів інженерного аналізу та спрощеної комп'ютерної моделі виробу із грубою сіткою скінченних елементів. Значення  $K_w$  передбачається визначати розрахунком коефіцієнта концентрації напружень для стикового зварного шва, в залежності від величин радіусу  $\rho$  та кута нахилу профілю шва  $\theta$  в місці переходу від основного металу до металу шва. Дані величини є стохастичними і призначаються на базі даних роботи [16] для заданої імовірності руйнування вузла  $P_f$  або рівня забезпеченості. Величина  $\rho$ , при цьому, повинна призначатись не меншою ніж радіус структурного елемента, тобто радіус такого мінімального об'єму металу сферичної форми, у якому ще може розвиватися механізм втомного руйнування. Формулу для розрахунку цього радіусу в залежності від границі міцності матеріалу  $\sigma_b$  можна знайти в роботі [17].

*Визначення точки «прив'язки» до результатів втомних випробувань типового осередку концентрації напружень.* «Прив'язка» до результатів втомних випробувань моделі досліджуваного вузла є однією з головних особливостей експериментально-теоретичного методу. Це дозволяє прийняти в розрахунок втомної міцності ряд факторів, які складно

або неможливо врахувати розрахунковим способом. Координати точки «прив'язки»  $\Delta\sigma_{н0}$  (Па),  $N_0$ , отримують за результатами статистичної обробки експериментальних даних серії втомних випробувань. Експериментальні данні отримують за умови пластичного деформування в осередку концентрації при максимальних значеннях номінальних напружень, що не перевищують границю плинності матеріалу моделі. Абсцису  $N_0$  рекомендується приймати приблизно на рівні  $10^4$ .

*Визначення параметрів інтенсивності зовнішнього навантаження.* В деяких випадках навантаження на вузли корпусу судна можна наближено представити як регулярне. Для розрахунку суднокорпусного вузла на втому експериментально-теоретичним методом в даному випадку інтенсивність зовнішнього навантаження характеризується величиною розмаху номінальних напружень на границях вузла  $\Delta\sigma_n$ , МПа. Для визначення останньої слід застосовувати методи «класичної» будівельної механіки корабля, наприклад, користуючись роботою [18], або використати програмні комплекси скінченно-елементного аналізу.

Для конструктивних вузлів корпусу судна є характерним головним чином стохастичне навантаження, яке має хвильове, вібраційне та інерційне походження. Крім того у вузлах корпусу судна виникають квазістатичні напруження, обумовлені операціями навантаження-розвантаження.

Лінійний закон розподілу розмахів номінальних напружень використовується в суднобудуванні для розрахунку втомної міцності суденгазовозів [19]. Також такий спектр навантаження може застосовуватись для розрахунку втомної міцності конструкцій суден, що експлуатуються в Північній Атлантиці. Стохастичне навантаження, розподілене за лінійним законом, представляють у вигляді восьми ординат розмахів номінальних напружень  $P_j$  та відповідних їм чисел циклів  $n_j$ , які визначаються наступними залежностями:

$$\begin{cases} P_j = \frac{17-2j}{16} P_0; \\ n_j = k_{\text{нав}} 10^j; j=1,2,\dots,8, \end{cases} \quad (4)$$

де  $P_0$  – розмах номінальних напружень із забезпеченістю  $10^{-8}$ , Па;  
 $k_{\text{нав}}$  – коефіцієнт для визначення кількості циклів на кожному рівні навантаження  $k_{\text{нав}}$  ( $k_{\text{нав}} = 0,9$  відповідно до Правил [19])

Для опису довготермінового розподілу розмахів номінальних напружень, що діють на границях конструктивних вузлів, у випадку суден інших типів та районів експлуатації застосовують закон Вейбулла, щільність розподілу відповідно до якого виражається наступною формулою:

$$p(\Delta\sigma_n) = k_{\text{вейб}} \left( \Delta\sigma_n^{k_{\text{вейб}}-1} / a_{\sigma}^{k_{\text{вейб}}} \right) \exp\left(-(\Delta\sigma_n / a_{\sigma})^{k_{\text{вейб}}}\right), \quad (5)$$

де  $k_{\text{вейб}}$ ,  $a_{\sigma}$  – параметр форми та масштабу розподілу.

Одним з перших широко використовуваних на теренах СНД методів визначення довготермінового розподілу зовнішнього навантаження на вузол є прямиий метод (за схемою Козлякова-Плеханова), який є описаним в роботі [20]. Подібний спосіб розрахунку параметрів довготермінового розподілу зовнішнього навантаження на конструкції верхньої палуби трампового судна застосовувався в [21]. Результати розрахунків, наведені в цій роботі, базувались на статистичній обробці даних натурних замірів комбінацій курсових кутів ходу судна та швидкості в залежності від інтенсивності хвилювання, що виконувались протягом певного часу. Також замірявся час перебування в кожній ділянці світового океану.

Маршрут, за яким буде експлуатуватись судно, що проектується, часто є невизначеним однозначно. Через дану причину для розрахунку параметрів довготермінового розподілу навантажень на вузол доцільно користуватись спрощеним підходом. Даний підхід в загальній формі є описаним в роботі [21] та рекомендаціях [22]. Він передбачає, що параметр масштабу розподілу за законом Вейбулла розмахів номінальних напружень, що діють на суднокорпусний вузол, для  $i$ -го розрахункового стану судна може бути визначеним наступним чином:

$$(a_{\sigma})_i = \frac{((\Delta\sigma_n)_x)_i}{(\ln N_x)^{1/k_{\text{вейб}}}}, \quad (6)$$

де  $((\Delta\sigma_n)_x)_i$  (Па) – величина розмаху характерних експлуатаційних номінальних напружень, що діють на границі суднокорпусного вузла в  $i$ -му розрахунковому стані судна при імовірності їх появи  $1/N_x$ . Величина  $((\Delta\sigma_n)_x)_i$  є зведеним розмахом напружень, що враховує одночасну дію місцевих навантажень та навантажень від загального повздожнього згину корпусу судна у вертикальній та горизонтальній площинах. Вона може бути розрахована згідно до відповідних рекомендацій Правил класифікаційних товариств, наприклад, користуючись [23]. Типові значення  $1/N_x$  знаходяться в межах від  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$ , та є різними для різних класифікаційних товариств.

Параметр форми, відповідно до рекомендацій [22], визначається формулою

$$k_{\text{вейб}} = 1,1 - 0,35 \frac{L - 100}{300}, \quad (7)$$

де  $L$  – довжина судна, м.

Спрощений підхід був застосований для визначення параметрів довготермінового розподілу зовнішнього навантаження за законом Вейбулла при розрахунку втомної міцності вузлів корпусу судна-балкера в роботі [14]. Причому, визначення величини втомного пошкодження  $D$  вузлів здійснювалось за допомогою декількох Правил класифікаційних товариств, а результати порівнювались між собою.



Враховуючи відносну простоту спрощеного підходу до розрахунку параметрів довготермінового розподілу зовнішнього навантаження на суднокорпусні вузли за законом Вейбулла та вказані раніше невизначеності, даний підхід може розглядатись як рекомендований для використання при розрахунку втомної міцності суднокорпусних вузлів експериментально-теоретичним методом.

Крім описаного спрощеного підходу, можуть бути застосовані інші розрахункові підходи, короткий опис яких представлено в роботі [24]. Їх використання, як правило, потребує більшого об'єму обчислень.

*Методика розв'язку задачі визначення втомної міцності суднокорпусного вузла.* У випадку даної задачі передбачається, що заданими є геометрія досліджуваного вузла та механічні характеристики матеріалу, з якого він виготовлений, а також використовуваний спосіб зварювання. Аналогічні дані повинні бути заданими для моделі вузла, для котрої була виконана серія втомних випробувань. Результати останніх є заданими також. При дії на суднокорпусний вузол навантаження стохастичного характеру слід також визначити коефіцієнт нижньої границі пошкоджуючих напружень  $\zeta$  (відповідно до публікації [7], можна прийняти, що  $\zeta = 0,55$ ).

Схема розв'язку задачі визначення втомної міцності суднокорпусного вузла при навантаженні регулярного характеру є описаною в роботах [8-10]. У випадку дії на вузол стохастичного навантаження, розподіленого за лінійним законом або законом Вейбулла, його втомна міцність характеризується величиною втомного пошкодження  $D$ , яка розраховується за формулами (1) або (2), відповідно. Причому, значення  $N_j$  у (1) або функцію  $N(\Delta\sigma_n)$  у (2) слід визначати, використовуючи удосконалений варіант експериментально-теоретичного методу для розрахунків при нерегулярному навантаженні.

Щільність імовірності розподілу величини  $\Delta\sigma_n$  у (2) виражається за допомогою формули (5), де параметри масштабу та форми розподілу можуть бути визначені спрощеним підходом або з використанням інших. При розрахунку втомного пошкодження вузла за весь період експлуатації слід враховувати усі розрахункові стани судна. В такому випадку сумарне втомне пошкодження буде визначатись наступним чином:

$$D_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ст}}} D_i, \quad (8)$$

де  $D_i$  – величина втомного пошкодження, накопичена в  $i$ -му розрахунковому стані судна;

$N_{\text{ст}}$  – число розрахункових станів, що приймається у розрахунок (мінімально необхідно розглядати два розрахункових стани: судно з повним вантажем та в баластному переході). При розрахунку величин  $D_i$  необхідно враховувати долю строку служби судна в  $i$ -тих умовах наван-

таження  $\alpha_j$ . Типові значення даного коефіцієнта представлені у рекомендаціях [22].

Верхню границю інтегрування при визначенні  $D_i$  для  $i$ -го розрахункового стану судна з використанням формули (2) слід визначати як розмах номінальних напружень, імовірність появи якого за розрахунковий термін служби є  $1/N^*$ . Нижній границі відповідає величина  $\bar{\sigma}_n'(8) \cdot \Delta\sigma_{н0}$ , яка є ординатою крайньої правої точки модифікованої кривої втоми при  $N = 10^8$  для розрахунків при нерегулярному навантаженні. Границі інтегрування також можуть бути заданими в умовах задачі.

При визначенні величини  $D_i$  з використанням лінійного закону для опису зовнішнього навантаження, величини  $n_j$  у (1) визначаються відповідно до (4), а величини  $N_j$  – з використанням модифікованої кривої втоми в залежності від розрахованих  $P_j$ . Причому, формулу (1) можна дещо конкретизувати наступним чином:

$$D = \sum_{j=1}^8 \frac{n_j}{N_j} + \frac{10^3}{N_{нр}}, \quad (9)$$

де  $N_{нр}$  – число циклів до появи тріщини, яке є функцією від розмаху напружень, обумовленого операціями навантаження-розвантаження судна  $(\Delta\sigma_n)_{нр}$  (квазістатичне навантаження).

Коефіцієнт асиметрії циклу номінальних напружень  $r_{mn}$  при розрахунку величини втомного пошкодження відповідно до формул (2) та (8) можна приймати на рівні 0,5 (віднульовий цикл). Взагалі, даний коефіцієнт при помірному рівні інтенсивності стохастичного зовнішнього навантаження, розподіленого за законом Вейбулла, не має суттєвого впливу на результат розрахунку втомної міцності. У випадку застосування лінійного закону (4) для опису довготермінового розподілу розмахів номінальних напружень при розрахунку втомної міцності суднокорпусних вузлів, коефіцієнт  $r_{mn}$ , відповідно до Правил [19], слід приймати на рівні 0 (симетричний цикл).

Втомна міцність суднокорпусного вузла вважається забезпеченою при умові, що  $D \leq D_{крит}$  ( $D_{крит}$  зазвичай приймають рівним одиниці). На базі визначеної величини втомного пошкодження  $D$  може бути розрахований очікуваний час до втомного руйнування.

*Методика розв'язку задачі визначення допустимого коефіцієнта концентрації напружень для суднокорпусного вузла за умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності.* Вихідні дані даної задачі є аналогічні до задачі визначення втомної міцності, проте, втомна міцність вузла є заданою. Для випадку дії на вузол навантаження стохастичного характеру задається величина міри втомного пошкодження  $D_3$  при заданих параметрах навантаження  $k_{вейб}$  та  $a_\sigma$  або  $k_{нав}$ ,  $P_0$  та  $(\Delta\sigma_n)_{нр}$ . Шуканою є величина допустимого, з умови забезпечення заданого рівня втомної

міцності, коефіцієнта концентрації напружень для досліджуваного вузла  $[K_t]_{\text{втом}}$ .

Схема розв'язку цієї задачі для випадку навантаження регулярного характеру є представленою в публікації [11]. При дії на вузол стохастичного навантаження розв'язок задачі, як вказується у роботі [1], визначається з наступного нелінійного рівняння:

$$D([K_t]_{\text{втом}}) = D_3, \quad (10)$$

де значення функції  $D([K_t]_{\text{втом}})$  можуть розраховуватись відповідно до (1) або (9) при використанні лінійного закону (4) для опису довготермінового розподілу розмахів номінальних напружень на границях вузла. Також значення функції  $D([K_t]_{\text{втом}})$  можуть бути розрахованими за формулою (2) при використанні закону Вейбулла, щільність імовірності розподілу розмахів номінальних напружень, відповідно якому, має вигляд (5).

Задана величина  $D_3$  може включати накопичене втомне пошкодження у конструктивному вузлі за час перебування судна в одному або декількох розрахункових станах. В останньому випадку параметри довготермінового розподілу розмахів номінальних напружень за законом Вейбулла слід зводити до узагальнених, що включають декілька розрахункових станів судна. Границі інтегрування при розрахунку  $D([K_t]_{\text{втом}})$  відповідно до формули (2) визначаються аналогічно до задачі визначення втомної міцності, якщо розглядається один розрахунковий стан судна, або використовуючи узагальнені параметри розподілу Вейбулла, які включають декілька розрахункових станів. Границі інтегрування також можуть бути заданими в умовах задачі. Розв'язок рівняння (10) виконується з використанням удосконаленого для розрахунків при нерегулярному навантаженні варіанту експериментально-теоретичного методу.

Для визначення величини  $[K_t]_{\text{втом}}$  необхідно задаватись певним діапазоном пошуку розв'язку рівняння  $(K_t)_{\min} \dots (K_t)_{\max}$ . Даний діапазон встановлюється, виходячи з типових значень теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень для вузлів досліджуваного типу. При виборі величини  $(K_t)_{\min}$  слід враховувати, що для заданих характеристик матеріалу вузла та моделі й параметрів «прив'язки», існує таке значення коефіцієнта концентрації напружень для досліджуваного вузла, при якому його крива втомти буде втрачати неперервність та фізичний зміст.

З умови узгодженості модифікованої кривої втомти та залежностей удосконаленого варіанту експериментально-теоретичного методу, які представлені в роботі [7], отримано наступну формулу для критичного значення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень:

$$(K_t)_{cr} = \left( \varphi_{cr} K_{t0}^{2/(1+m_0)} \frac{\sigma_{T_1}^{(1-m)/(1+m)}}{\sigma_{T0}^{(1-m_0)/(1+m_0)}} \right)^{(1+m)/2}, \quad (11)$$

де  $m, m_0$  – показник степеневій апроксимації діаграми деформування матеріалу досліджуваного вузла та моделі;

$\varphi_{cr}$  – критичне значення функції, що враховує відмінності геометричних та механічних характеристик досліджуваного конструктивного вузла та моделі, що випробовувалась на втому;

$\sigma_T, \sigma_{T0}$  – границі плинності матеріалу досліджуваного вузла і моделі, відповідно.

Величину  $(K_I)_{min}$  необхідно призначати на рівні, не меншим, ніж  $(K_I)_{cr}$ .

*Методика розв'язку задачі визначення допустимого параметру зовнішнього навантаження на суднокорпусний вузол з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності.* Вихідні дані для задачі даного типу є аналогічними до задачі визначення втомної міцності, за виключенням того, що параметри зовнішнього навантаження для заданої втомної міцності вузла є шуканими величинами. Для випадку дії на вузол стохастичного навантаження задається величина міри втомного пошкодження вузла  $D_3$ . Шуканими є допустимі, з умови забезпечення заданого рівня втомної міцності, величина розмаху номінальних напружень із забезпеченістю  $10^{-8}$  [ $P_0$ ] (Па) або параметр масштабу розподілу Вейбулла  $[\alpha_\sigma]_{втом}$  (Па). В першому випадку крім величини  $D_3$  необхідно задавати  $k_{нав}$  та  $(\Delta\sigma_n)_{нр}$  (Па), в другому – величину  $k_{вейб}$ .

Схема розв'язку задачі при дії на вузол навантаження регулярного характеру описана в публікаціях [8-10]. При дії на вузол стохастичного навантаження, як вказується у роботі [1], розв'язок задачі слід визначати з одного з наступних нелінійних рівнянь:

$$D([P_0]_{втом}) = D_3, \quad (12)$$

$$D([\alpha_\sigma]_{втом}) = D_3. \quad (13)$$

В першому рівнянні функція  $D([P_0]_{втом})$  виражається формулою (1) або (9), при цьому зовнішнє навантаження на вузол передбачається розподіленим за лінійним законом (4). У другому рівнянні функція  $D([\alpha_\sigma]_{втом})$  визначається формулою (2), в якій щільність імовірності  $p(\Delta\sigma_n)$  розподілу величини  $\Delta\sigma_n$  апроксимується відповідно до (5). Задана величина  $D_3$  у (13), може являти собою втомне пошкодження, накопичене у суднокорпусному вузлі за час перебування судна в одному або декількох розрахункових станах. Відповідно, шукані величини  $[P_0]_{втом}$  або  $[\alpha_\sigma]_{втом}$  можуть бути узагальненими та включати декілька розрахункових станів, або лише один розрахунковий стан. При розрахунку значень функції  $D([\alpha_\sigma]_{втом})$  за формулою (2) верхню границю інтегрування слід визначати, як розмах номінальних напружень, що відповідає  $N = 1$ , тобто  $(\Delta\sigma_n)_{max} = (\bar{\sigma}_n) \cdot \Delta\sigma_{н0}$ . Нижній границі відповідає розмах  $\bar{\sigma}'_n(8) \cdot \Delta\sigma_{н0}$ . Границі інтегрування можуть бути заданими в умовах задачі. Також задаються діапазони пошуку розв'язку рівнянь (12) або (13):  $(P_0)_{min} \dots (P_0)_{max}$  або  $(\alpha_\sigma)_{min} \dots (\alpha_\sigma)_{max}$ , відповідно.

На базі визначених величин  $[P_0]_{\text{втом}}$  або  $[\alpha_\sigma]_{\text{втом}}$  також можна отримати умову достатньої втомної міцності суднокорпусного вузла.

*Приклад застосування розроблених методик.* На прикладі вузла перетину рівновеликих балок, схема якого представлена на рис. 1, а, нижче показано розв'язок усіх описаних раніше задач втомної міцності. Для моделей даного вузла була проведена серія втомних випробувань. Фотографія зразка з тріщиною, яка утворилась внаслідок циклічних випробувань, представлена на рис. 1, б.

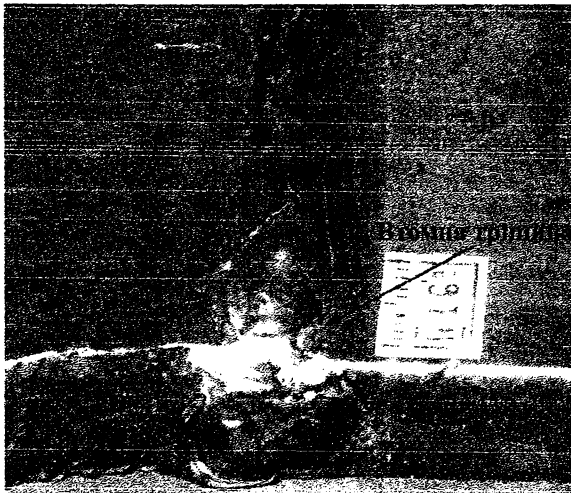
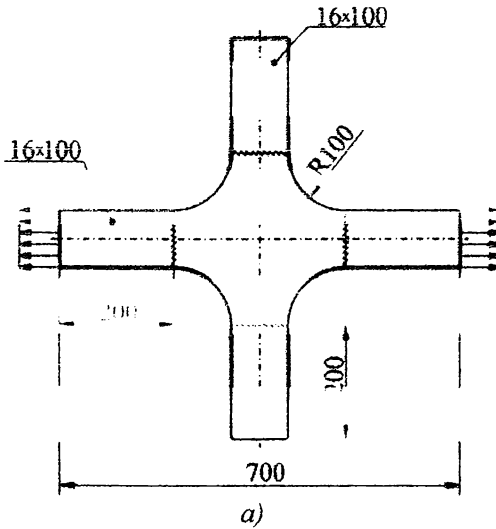


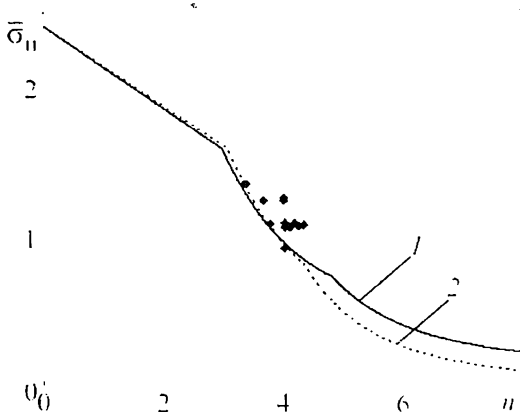
Рис. 1. Вузол перетину поясів рівновисоких балок:  
а – схема вузла; б – втомна тріщина у моделі вузла

*Вихідні дані:* матеріал досліджуваного вузла – сталь категорії D40 (границя плинності  $\sigma_T = 410$  МПа; границя міцності  $\sigma_B = 620$  МПа; відносне видовження після розриву  $\delta_5 = 23,1\%$ ; модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа); характеристики матеріалу ( $\sigma_{T0}$ ;  $\sigma_{B0}$ ;  $\delta_{50}$ ,  $E_0$ ) та геометрія моделей, що випробовувались на втому, співпадають із такими самими для досліджуваного вузла; спосіб виготовлення досліджуваного вузла та його моделей – ручне дугове зварювання в цехових умовах; коефіцієнт нижньої границі пошкоджуючих напружень  $\zeta = 0,55$ ; коефіцієнт асиметрії циклу напружень  $r_{min} = 0,5$ .

*Розрахункові вихідні дані.* Теоретичні коефіцієнти концентрації напружень  $K_t$ ,  $K_{t0}$  для вузла та моделі були розраховані описаним раніше спрощеним способом, з використанням робіт [15], [16]. Отримані значення для  $P_f = 2,4\%$  складали:  $K_t = K_{t0} = 3,02$ . За результатом статистичної обробки даних втомних випробувань були отримані наступні координати точки прив'язки для  $P_f = 2,4\%$ :  $\Delta\sigma_{H0} = 260,7$  МПа;  $N_0 = 7943$ .

*Приклад розв'язку задачі визначення втомної міцності суднокорпусного вузла.* До вихідних даних, окрім наведених раніше, відносяться параметри розподілу за законом Вейбулла розмахів номінальних напружень на границях вузла. Параметри розподілу за умови повністю завантаженого судна є наступними:  $k_{вейб} = 1,05$ ;  $a_\sigma = 9,14$  МПа; очікуване число циклів навантаження за строк експлуатації  $N^* = 10^8$ ; тип судна – нафтоналивне. Для суден вказаного типу, користуючись рекомендаціями [22], можна наближено прийняти  $\alpha_1 = 0,5$ .

Криві втоми вузла відповідно до базового та модифікованого варіантів експериментально-теоретичного методу наведені на рис. 2 із номерами 1 та 2, відповідно.



*Рис. 2. Криві втоми вузла перетину поясків рівновисоких балок в порівнянні з даними втомних випробувань моделі вузла*

Втомне пошкодження суднокорпусного вузла в умовах повного завантаження визначається за формулою (2), з врахуванням коефіцієнта  $\alpha_1$ . Границі інтегрування:  $(\Delta\sigma_n)_{\min} = 27,96$  МПа;  $(\Delta\sigma_n)_{\max} = 146,56$  МПа;  $N(\Delta\sigma_n)$  – залежність, що виражається модифікованою кривою втоми, представленою на рис. 2 пунктирною лінією. Шукана величина втомного пошкодження за умови повністю завантаженого судна  $D = 0,065$ .

*Приклад розв'язку задачі визначення допустимого коефіцієнта концентрації напружень для суднокорпусного вузла з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності.* Вихідні дані цієї задачі включають наведені раніше характеристики матеріалу досліджуваного вузла та його моделі, коефіцієнт  $\zeta$ , коефіцієнт  $K_{\sigma}$  та координати точки «прив'язки»  $\Delta\sigma_{н0}$ ,  $N_0$  (для  $P_f = 2,4\%$ ). Задані також наступні величини: втомне пошкодження вузла  $D_3 = 1$ ; узагальнені параметри розподілу Вейбулла  $k_{вейб} = 1,05$  та  $a_{\sigma} = 9,14$  МПа; число циклів  $N^* = 10^8$ ; нев'язка для пошуку розв'язку нелінійного рівняння  $\Delta_{нев} = 0,02$ . Діапазон зовнішніх навантажень на вузол розповсюджується на усі пошкоджуючі розмахи номінальних напружень. Невідомою є величина  $[K_I]_{втом}$  для досліджуваного вузла, яка належить діапазону її можливих значень:  $(K_I)_{\max} = 5$ ,  $(K_I)_{\min} = 2$ .

Критична величина концентрації напружень, відповідно до (11), є наступною:  $(K_I)_{cr} = 1,58$ . Таким чином  $(K_I)_{cr} < (K_I)_{\min}$  та змінювати нижню границю пошуку розв'язку немає необхідності.

Для визначення розв'язку даної задачі використовуються рівняння (10) та (2). Границі інтегрування у (2) є наступними:  $(\Delta\sigma_n)_{\min} = 27,96$  МПа;  $(\Delta\sigma_n)_{\max} = 146,56$  МПа. Розв'язком нелінійного рівняння (10) є величина  $[K_I]_{втом} = 3,62$ .

*Приклад розв'язку задачі визначення допустимого параметру зовнішнього навантаження на суднокорпусний вузол з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності.* Вихідні дані цієї задачі включають наведені раніше характеристики матеріалу досліджуваного вузла та його моделі, коефіцієнт  $\zeta$ , коефіцієнти  $K_{\sigma}$ ,  $K_{\sigma}$  та координати точки «прив'язки»  $\Delta\sigma_{н0}$ ,  $N_0$  (для  $P_f = 2,4\%$ ). Задані також наступні величини: втомне пошкодження вузла  $D_3 = 1$ ; параметр форми розподілу Вейбулла  $k_{вейб} = 1,05$ ; число циклів  $N^* = 10^8$ ; нев'язка для пошуку розв'язку нелінійного рівняння  $\Delta_{нев} = 0,025$ . Діапазон зовнішніх навантажень на вузол розповсюджується на усі пошкоджуючі розмахи номінальних напружень. Невідомою є величина  $[\alpha_{\sigma}]_{втом}$  для досліджуваного вузла, яка належить діапазону її можливих значень:  $(\alpha_{\sigma})_{\max} = 5$ ,  $(\alpha_{\sigma})_{\min} = 2$ .

Шукана величина визначається з розв'язку нелінійного рівняння (13), з використанням (2).

Границі інтегрування є наступними:

$$(\Delta\sigma_n)_{\min} = 27,96 \text{ МПа}; (\Delta\sigma_n)_{\max} = 620 \text{ МПа}.$$

Для представлених вихідних даних розв'язок вказаного нелінійного рівняння буде таким:  $[\alpha_{\sigma}]_{втом} = 11,73$  МПа.

**Висновки.** Розроблені методики розв'язку практичних задач втомної міцності суднокорпусних вузлів. На базі вузла перетину рівновеликих балок показані приклади застосування таких методик для вирішення перелічених задач.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Petinov S.V. Life-Cycle Fatigue Reliability of Ship Structures: A Proposed System // Journal of Ship Research. – Vol. 44. – № 1. – March 2000. – P. 33-39.*
2. *Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Анализ и классификация методов оценки усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 3 (37). – С. 104-118.*
3. *Суслов В.П., Коростылев Л.И., Штырев Н.А. О расчетной оценке усталостной прочности конструктивных узлов судового корпуса // Строительная механика корабля: Сб. научн. трудов. – Николаев: НКИ. – 1987. – С. 35-42.*
4. *Коростылев Л.И. Оценка усталостной прочности судовых корпусных конструкций с концентраторами напряжений // Тр. Второй междунар. конф. по судостроению (Санкт-Петербург, 24-26 ноября 1998 г.). – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 160-167.*
5. *Коростылев Л.И. Практическая реализация экспериментально-теоретического метода расчетной оценки усталостной долговечности судовых конструкций: Зб. наук. праць УДМТУ. – Николаев: УГМТУ, 1998. – № 3 (351). – С. 3-9.*
6. *Коростылев Л.И., Клименков С.Ю. Оценка усталостной прочности сварных узлов тонкостенных конструкций в многоцикловой области // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: Зб. наук. праць ДНУ ім. О. Гончара. – Днепропетровск: Наука і освіта, 2010. – № 11 (352). – С. 152-159.*
7. *Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Оценка усталостной прочности судокорпусных узлов экспериментально-теоретическим методом с учетом нерегулярности нагружения // Вісник ОНМУ. – № 1 (50). – Одеса: ОНМУ, 2017. – С. 71-91.*
8. *Коростылев Л.И. Расчет усталостной прочности конструктивных узлов судового корпуса: Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 3 (381). – С. 3-9.*



9. Коростильов Л.І. Розрахунок міцності та проектування конструктивних вузлів суднового корпусу при змінному навантаженні // *Кораблебудування: освіта, наука, виробництво: Матеріали міжнар. конф.: В 2 т. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – Т 1. – С. 196-197.*
10. Korostylov L.I. Fatigue Strength Calculation of the Ship Structural Details and Their Design // *Third International Shipbuilding Conference – ISC'2002: Proceedings, Section C. – St. Petersburg: Krylov Shipbuilding Research Institute, 2002. – P. 144-148.*
11. Коростылев Л.И. Проектирование конструктивных узлов судового корпуса с учетом усталости: *Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 4 (382). – С. 24-31.*
12. Petinov S.V., Afanasyeva I.M. Fatigue Assessment of Structures in High-cycle Segment: Technique and Problems // *Proc. of the International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics -2010», St. Petersburg, Russia, 2010. – P. 519-525.*
13. Гучинский Р.В. Разработка узла конструкции судна по условию усталостной долговечности / Р.В. Гучинский, С.В. Петиннов // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – № 159. – С. 177-186.*
14. Blagojević Branko, Željko Domazet Simplified procedures for fatigue assesment of ship structures // *10th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM). – Rethymnon: Hellenic Institute of Marine Technology, 2002.*
15. Коростылёв Л.И., Литвиненко Д.Ю. Оценка коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах тонкостенных конструкций расчетом макро- и микроконцентрации // *Наук. вісн. ХДМА. – 2015. – № 2 (13). – С. 174-184.*
16. Коростылёв Л.И., Литвиненко Д.Ю. Анализ микрогеометрических параметров стыковых и угловых сварных швов конструктивных узлов: *Зб. наук. праць НУК. – 2015. – № 2 (458). – С. 28-34.*
17. Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций: Учебное пособие / Л.А. Копельман. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2010. – 464 с.
18. Постнов В.А. Строительная механика корабля и теория упругости: Учебник для вузов. – В 2-х. – т. – Т. 2. Изгиб и устойчивость стержней, стержневых систем, пластин и оболочек / В.А. Постнов, Д.М. Ростовцев, В.П. Сулов и др. – Л.: Судостроение, 1987. – 416 с.
19. Liquefied Gas Carriers // *Det Norske Veritas: Rules for Classification of Ships. – Det Norske Veritas AS. – Pt. 5. – Ch. 5. – 2013. – 124 p.*

20. Путов Н.Е. Проектирование конструкций корпуса морских судов. Ч. 2: Нагрузки на корпус судна на нерегулярном волнении. Обеспечение общей прочности корпуса / Н. Е. Путов. – Ленинград: Судостроение, 1977. – 423 с.
21. Glen I.F. Fatigue-Resistant Detail Design Guide for Ship Structures / I.F. Glen, A. Dinovitzer, R.B. Paterson, L. Luznik, C. Bayley. – Ship Structure Committee: Report SSC-405. – Washington, March 1999. – 206 p.
22. Fatigue assessment of ship structures. – IACS Recommendation. – № 56. – July 1999. – 27 p.
23. Российский морской регистр судоходства: Сб. нормативно-методических материалов. – Кн.11. – НД № 2-139902-016. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2002. – 151 с.
24. DNV Fatigue Assessment of Ship Structures. – Classification notes. – № 30.7. – Det Norske Veritas. – Norway, 2014. – 108 p.

*Стаття надійшла до редакції 15.11.2017*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор кафедри «Прикладна та вища математика» Черноморського національного університету ім. Петра Могили **Л.М. Дихта**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Конструкція корпусу корабля» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова **Ю.М. Коробанов** (м. Миколаїв)

УДК 629.5.015.4:624.03

Э.П. Лукаш, М.И. Партолога

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ВИБРАЦИИ БУКСИРА LINZ

*Приведен пример практического применения комплексного расчетно-экспериментального анализа напряженно-деформированного состояния корпусных конструкций буксира при действии статических и динамических нагрузок. Результаты анализа использовались при обосновании технических решений.*

**Ключевые слова:** корпусные конструкции, вибрация, усталостные повреждения.

*Наведений приклад практичного застосування комплексного розрахунково-експериментального аналізу напружено-деформованого стану конструкцій корпусу під дією статичного та динамічного навантаження. Результати аналізу було використано для підтримки технічних рішень.*

**Ключові слова:** конструкції корпусу, вібрації, втома пошкодження.

*An example of the practical application of the comprehensive settlement and experimental analysis of stress-strain State of hull constructions tug under the action of static and dynamic loads. The results of the analysis were used to support technical decisions.*

**Keywords:** hull design, vibration, fatigue damage.

В настоящее время наблюдается относительный рост объемов усталостных повреждений корпусных конструкций, особенно скоростных судов и судов смешанного река-море плавания (СПП). Скоростные суда в период эксплуатации испытывают значительные ударные нагрузки, а сравнительно гибкие суда СПП подвержены действию дополнительных динамических изгибающих моментов, соизмеримых по величине с амплитудой квазистатических волновых моментов. Приближение срока эксплуатации судов к предельному способствует повышению вероятности усталостных отказов конструкций, что подчеркивает целесообразность разработки более совершенных методов расчетного анализа динамических параметров судовых конструкций [1].

Рассматриваемое судно (год постройки 1970 – Австрия) до 2016 года эксплуатировалось на Дунае в качестве буксира на линии Измаил-Линц (рис.1).

---

© Лукаш Э.П., Партолога М.И., 2017



В 2005 году на буксире была произведена замена главной энергетической установки на более мощные высокооборотные двигатели Caterpillar 3516B мощностью 2200 л.с. (взамен старых двигателей Simmering Graz Pauker FGT1112C мощностью 1100 л.с. каждый) и использование буксира в качестве толкача. Эти мероприятия привели к ряду побочных эффектов, в том числе повышенной вибрации на максимальных режимах движения буксира и толкаемого каравана барж, образованию усталостных трещин в корпусе, увеличению нагрузки на конструкции надстройки, появлению перекосов дверных проемов.

Изучением последствий замены двигателей и оценке возможных модернизационных мероприятий по заказу судовладельца занималась экспериментальная группа ЧП «Авангард морские технологии и Ко» (Одесса) при расчетном сопровождении специалистами ОНМУ и ОНМА. Ниже приведены фрагменты результатов расчетного анализа общей вибрации судна как плавающей непризматической балки, а также выполнен уточненный анализ напряженно-деформированного состояния по МКЭ.

### Характеристики судна

Длина судна расчетная, м .....	37
Ширина, м .....	10,8
Осадка, м .....	1,85
Водоизмещение, т.....	450
Момент инерции сечения на миделе, м <sup>4</sup> .....	0,245

Итоговое распределение масс с учетом присоединенных масс жидкости приведено в табл. 1. В табл. 2 приведены частотные характеристики источников вибрации.

*Таблица 1*

*Итоговое распределение масс с учетом присоединенных масс жидкости по длине судна проекта LINZ*

Осадка			
Номер эл.	Хн от мид.	Хк от мид.	масса, т
1	2	3	4
1	18,5	16,7	5
2	16,7	14,8	68
3	14,8	13,0	82
4	13,0	11,1	95
5	11,1	9,3	101
6	9,3	7,4	105
7	7,4	5,6	110
8	5,6	3,7	110

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
9	3,7	1,9	110
10	1,9	0,0	110
11	0,0	-1,9	110
12	-1,9	-3,7	110
13	-3,7	-5,6	110
14	-5,6	-7,4	110
15	-7,4	-9,3	105
16	-9,3	-11,1	105
17	-11,1	-13,0	101
18	-13,0	-14,8	90
19	-14,8	-16,7	72
20	-16,7	-18,5	5

Таблица 2

Номер п/п	Наименование источника возмущающих сил	Частоты, мин <sup>-1</sup>
1	Частота вращения гребного вала, $n$	323 (5,38)
2	Лопастная частота, $N1=n*z = 323*4$	1292 (21,5)
3	Частота вращения коленчатого вала двигателя	1600 (26,7)
4	Удвоенная частота вращения коленчатого вала двигателя	3200 (53,3)

Расчет общей вибрации судна выполнен методом Папковича П.Ф. [2; 3] с учетом деформаций сдвига, инерции вращения сечений и присоединенной массы жидкости.

Для определения присоединенных масс жидкости при колебаниях по двум первым формам ( $I = 1,2$ ) используется формула Локквуд-Тейлора

$$r_i = 0,5\pi\gamma k_i C_v b^2 \quad (1)$$

Фундаментальные функции для  $i$ -й формы колебаний приняты в виде

$$\varphi_i(\xi) = \alpha_i + 20\beta_i + f_i(\xi) \quad (2)$$

где  $f_i(\xi)$  –  $i$ -я форма главных свободных колебаний безопорного призматического стержня;

$\xi = x/L$  – безразмерная координата.

Фундаментальные функции удовлетворяют граничным условиям на концах эквивалентного бруса. Постоянные параметры  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  и фундаментальные функции  $\varphi_1(\xi)$  и  $\varphi_2(\xi)$  вычислены, исходя из условий уравновешенности судна (3). В таблице 3 выполнен расчет первой формы  $\varphi_1(\xi)$ . На рис. 2 приведен в характерная трехузловая форма свободных колебаний. На рис. 3 выполнено сопоставление частот.

$$\int_0^1 p(\xi) \varphi(\xi) d\xi = 0 \quad (3)$$

$$\int_0^1 p(\xi) \varphi(\xi)(\xi - 0,5) d\xi = 0$$

Таблица 3

Вычисление фундаментальной функции  $\varphi_1(\xi)$

Теор. шп. номера	P	P/P <sub>sp</sub>	p/p <sub>0</sub>	20*(x/L - 0,5)	f <sub>1</sub> (x/L)	(3)*(4)	(3)*(5)	(6)*(4)	(7)*(4)	β*(4)	φ <sub>1</sub> (ξ)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0,0	0	0	0,00	10,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	1,0
1,0	5	3	0,05	9,0	0,8	0,4	0,0	3,6	0,3	-0,1	0,8
2,0	68	37	0,61	8,0	0,5	4,9	0,3	39,2	2,6	-0,1	0,6
3,0	82	44	0,74	7,0	0,3	5,2	0,2	36,2	1,6	-0,1	0,4
4,0	95	51	0,86	6,0	0,1	5,1	0,1	30,8	0,5	-0,1	0,1
5,0	101	55	0,91	5,0	-0,1	4,5	-0,1	22,7	-0,5	-0,1	0,0
6,0	105	57	0,95	4,0	-0,3	3,8	-0,3	15,1	-1,0	0,0	-0,2
7,0	110	59	0,99	3,0	-0,4	3,0	-0,4	8,9	-1,2	0,0	-0,3
8,0	110	59	0,99	2,0	-0,5	2,0	-0,5	4,0	-1,0	0,0	-0,4
9,0	110	59	0,99	1,0	-0,6	1,0	-0,6	1,0	-0,6	0,0	-0,5
10,0	110	59	0,99	0,0	-0,6	0,0	-0,6	0,0	0,0	0,0	-0,5
11,0	110	59	0,99	-1,0	-0,6	-1,0	-0,6	1,0	0,6	0,0	-0,5
12,0	110	59	0,99	-2,0	-0,5	-2,0	-0,5	4,0	1,0	0,0	-0,4
13,0	110	59	0,99	-3,0	-0,4	-3,0	-0,4	8,9	1,2	0,0	-0,3
14,0	110	59	0,99	-4,0	-0,3	-4,0	-0,3	15,9	1,1	0,0	-0,1
15,0	105	57	0,95	-5,0	-0,1	-4,7	-0,1	23,6	0,5	0,1	0,1
16,0	105	57	0,95	-6,0	0,1	-5,7	0,1	34,1	-0,6	0,1	0,3
17,0	101	55	0,91	-7,0	0,3	-6,4	0,3	44,6	-2,0	0,1	0,5
18,0	90	49	0,81	-8,0	0,5	-6,5	0,4	51,9	-3,5	0,1	0,7
19,0	72	39	0,65	-9,0	0,8	-5,8	0,5	52,5	-4,5	0,1	1,0
20,0	5	3	0,05	-10,0	1,0	-0,5	0,0	4,5	-0,5	0,1	1,2
Суммы			16,3			-9,6	-2,3	402,6	-5,8	Alfa=	0,15
Испр.сум			16,3			-7,6	-2,3	400,3	-5,6	Beta=	0,02

Сравнение расчетных резонансных частот с частотами наиболее энергоемких возмущающих сил первого лопастного порядка свидетельствует о достаточном запасе по частоте. Однако близость к резонансной зоне частоты вращения вала 5,38 Гц требует уточненной оценки параметров свободных колебаний и вынужденной вибрации корпуса судна.

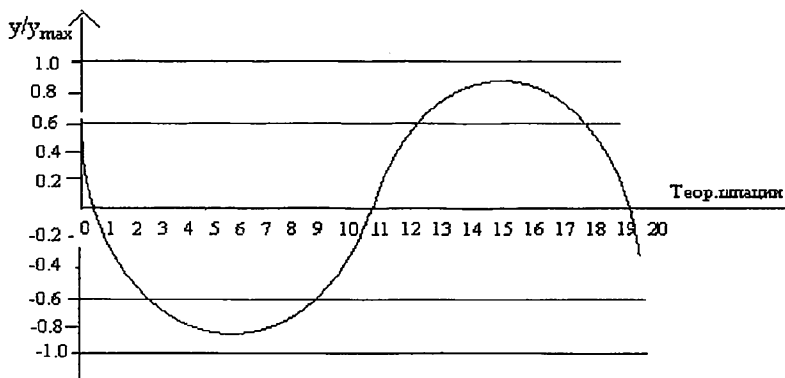


Рис. 2. Трехузловая форма свободных колебаний

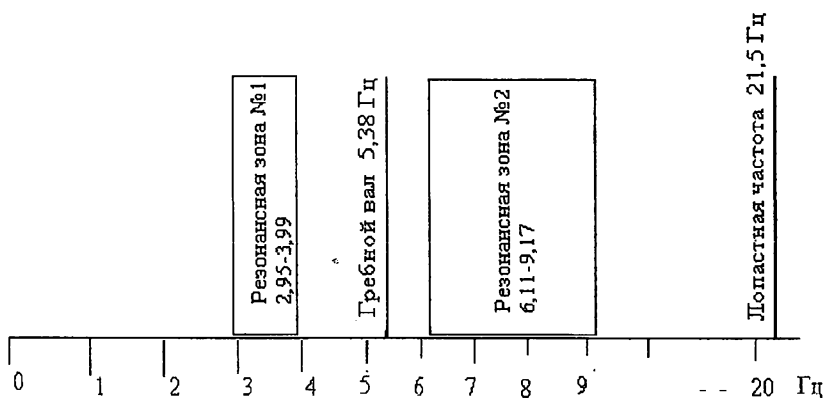


Рис. 3. Сопоставление частот свободных колебаний с частотами возмущающих сил

Для равномерной передачи усилий из зоны контакта буксиратолкача с караваном барж на основной корпус в период ремонтных работ были установлены накладные листы, как это показано на рис. 4.

Расчетный анализ показывает достаточную эффективность статической работы подкреплений. На рис. 5 отражены результаты анализа НДС корпуса с учетом выполненной модернизации. Степень влияния подкреплений на частотные характеристики незначительна.



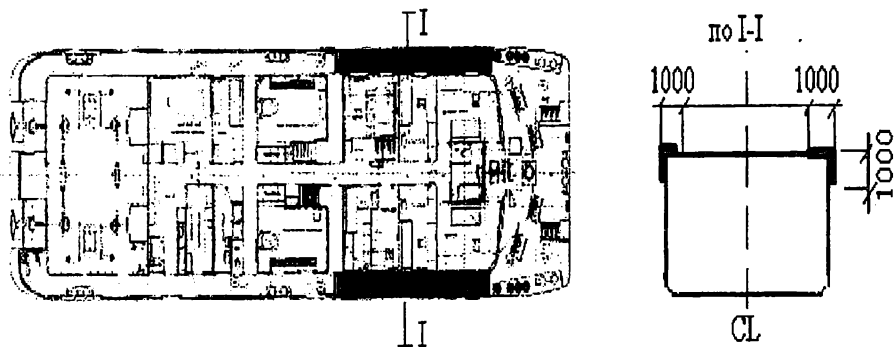


Рис. 4. Эскиз установки накладных листов ( $\delta = 10\text{мм}$ )  
в р-не 40-62 шп. на главной палубе

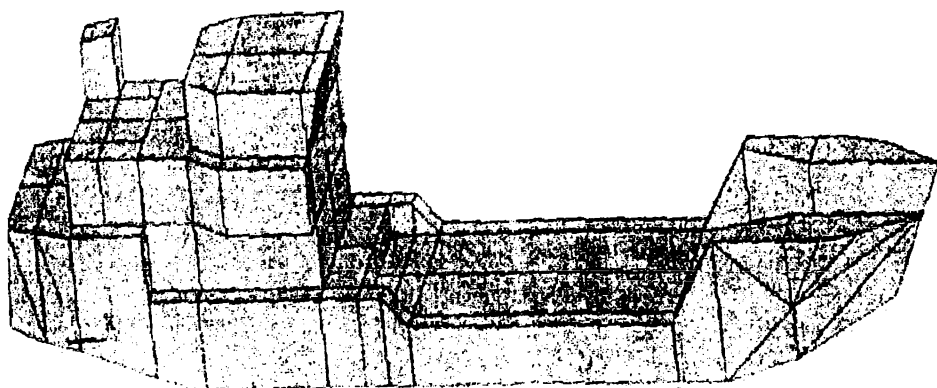


Рис. 5. Распределение напряжений (по Мизесу)  
в связях корпуса при толкании каравана барж

**Выводы.** Частотный интервал второй резонансной зоны близок к частоте вращения вала, что может служить причиной развития вибрации на определенных режимах хода. При этом максимальные амплитуды вертикальных колебаний на трехузловой форме будут развиваться в оконечностях. Это явление зафиксировано экспериментально.

Следует также заметить, что в кормовой оконечности жесткость корпуса значительно ниже жесткости миделевого сечения. Поскольку реальным путем выхода из резонансной зоны является повышение жесткости, например, путем увеличения толщин обшивки, следует оценить также экономическую целесообразность модернизации. Кроме этого, необходим расчет крутильных колебаний вала и выполнение торсиографирования для оценки динамических свойств системы винт-вал-корпус и обоснования мероприятий по снижению вибрации.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Правила классификации и постройки судов МРС.* – СПб., 2002. – 350 с.
2. *Методика расчетной оценки вибрации палуб жилых и служебных помещений надстроек транспортных судов.* – Вып. 30877. – Л.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1985. – 231 с.
3. *Постнов В.А., Калинин В.С., Ростовцев Д.М. Вибрация корабля.* – Л.: Судостроение, 1983. – 148 с.

*Стаття надійшла до редакції 20.11.2017*

#### **Рецензенти:**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Безпека життєдіяльності, екологія та хімія», професор Одеського національного морського університету **О.Б. Ляшенко**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету **В.В. Олейніков**

УДК 620.193.12

А.В. Кобзарук, А.И. Сабуров, Б.В. Смажило

**МАЛОЦИКЛОВАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ В МОРСКОЙ ВОДЕ  
КОРПУСНЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ СТОЙКОСТЬЮ  
К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ**

*Представлены результаты испытания на малоцикловую усталость корпусных сталей с различной стойкостью к коррозионному растрескиванию в природной морской воде в зависимости от частоты и уровня нагружения.*

*Ключевые слова: малоцикловая усталость, коррозионное растрескивание, частота нагружения, судостроительная корпусная сталь.*

*Представлені результати випробування на малоциклову втому корпусних сталей з різною стійкістю до корозійного розтріскування у природній морській воді в залежності від частоти і рівня навантаження.*

*Ключові слова: малоциклова втома, корозійне розтріскування, частота навантаження, суднобудівна корпусна сталь.*

*The results of the test for low-cycle fatigue of body steels with different steadfast to stress-corrosion cracking in natural sea water are presented, depending on the frequency and loading level.*

*Keywords: low cycle fatigue, stress corrosion cracking, loading frequency, ship-building steel body.*

**Введение.** Современное состояние науки и техники уже не удовлетворяется сложившимся ранее представлением о работе материала в составе напряженных конструкций. Изменились направления расчетов прочности проектируемых конструкций. Стремление максимально сократить вес и стоимость изделий привело к использованию в ряде случаев низколегированных свариваемых сталей повышенной прочности; прослеживается тенденция применения облегченных высоконапряженных конструкций предназначенных для работы при ограниченном числе циклов то есть при малоцикловой усталости. В таких конструкциях предполагается возможность работы отдельных узлов при напряжениях, превышающих предел упругости, что позволяет полнее реализовать прочностные свойства материала. В связи с увеличением напряженности материала реальную угрозу представляют повреждения из-за хрупкого разрушения, вызванного коррозионным растрескиванием при статическом нагружении и малоцикловой усталостью под действием циклических нагрузок и агрессивной среды.

Малоцикловому нагріву і корозійному растрескиванню в морській воді і в атмосфері морського повітря підврені окремі елементи судокорпусних конструкцій, корпусу підводних лодок і глибоководних апаратів, плавучих нафто- і газодобуваючих платформ, башни і стрели морських плавкранів, конструкції причалів і інші об'єкти. Продовжителюність циклу при цьому може тривати від кількох хвилин до кількох днів і навіть тижнів. В той же час за 10 років служби загальне число повторних нагрівань не перевищує  $10^4$  циклів (звичайна база малоциклових випробувань) [1].

Діяння нагрівань на судову конструкцію змінно по величині і нестационарно по часу і аналітично може бути представлено ймовірнісним розподілом. В експлуатаційних умовах в корпусі судна виникають як високочастотні, так і низькочастотні змінні напруження. Високочастотні змінні напруження викликані вібрацією і коливанням корпусу, зв'язаних з гідродинамікою. Ударні хвилі в районі носової оконечності сприяють вільним коливанням корпусу крупнотоннажного судна з частотою 670-1000 МГц [2], а для судів невеликого водоісщення 1200-2000 МГц. Згідно цьому розподілу, в умовах експлуатації неминиміальні тимчасові перегрівання, які при помірно загальному напруженості корпусу судна можуть викликати місцеві пластичні циклічні деформації, т.е. малоциклову втоми. Вичерпання пластичності матеріалу при малоцикловій втоми може викликати крихке руйнування.

Прямими дослідженнями, проведенними на судах різного класу [2; 3], встановлено, що елементи корпусу судна випробують в основному вигинаючі нагрівання; найбільш характерний цикл нагрівання асиметричний. В елементах корпусу завжди існують залишкові напруження від гнбкі, зборки і зварки, змінні напруження, виникаючі при плаванні, в поєднанні з вищевказаними залишковими напруженнями створюють асиметрію циклу нагрівання.

При розрахунках міцності судостроїтельних конструкцій необхідно враховувати зміну механічних властивостей матеріалу (міцність, вносилість і пластичність) під впливом морської води. Метою цих розрахунків є знаходження коефіцієнтів впливу середовища, знайдених експериментально. Существенное влияние на механічні властивості металу в експлуатаційних умовах викликає корозійна середовище, діюча одночасно з його нагріванням. При цьому деформація інтенсифікує корозійний процес на активірованій поверхні металу, а середовище, в свою чергу, полегшує деформування і сприяє прискоренню руйнування металу [4]. Для проявлення впливу корозійної середовища на механічні властивості металу потрібно, як правило, довгий проміжок часу.

Представляють великий інтерес дослідження корозійно-механічної міцності судостроїтельних матеріалів в умовах, по частоті, рівню деформації і характеру впливу середовища приближених

к эксплуатационным. Ранее такие испытания проводились в 3,5 %-ом водном растворе NaCl либо в синтетической морской воде, близкой по химическому составу к океанской. Однако известно [5; 6], что естественная морская вода по своей коррозионной активности значительно агрессивней синтетической. Исследованиями [6; 7] показано, что коррозионное поведение материала в открытом море совершенно иное, чем в синтетической морской воде, свободной от микрофлоры. Жизнедеятельность бактерий, водорослей и морских животных значительно изменяют состав морской воды и её коррозионно-агрессивные свойства.

В созданном в Одессе для нужд судостроения Отделе морской коррозии ФМИ НАН Украины был проведен целый комплекс исследований коррозионно-механической прочности судостроительных материалов в природной морской воде акватории Нефтегавани. Выполнены [8; 9] коррозионные и коррозионно-биологические исследования свойств морской воды в акватории испытательных лабораторий за период проведения испытаний, а также коррозионно-механические испытания ряда металлов используемых в судостроении. Часть испытаний проведена на опытных образцах в природных морских условиях на коррозионном пирсе, часть – в лабораторных помещениях.

В лабораторных условиях проводились коррозионные, коррозионно-усталостные испытания и исследования склонности к коррозионному растрескиванию опытных образцов на испытательных машинах. Параметры цикла нагружения (частота, форма цикла и уровень циклической деформации) приближались к реальным эксплуатационным условиям деформирования исследуемых материалов в составе конструкции. Исследования малоциклового усталости конструкционных сталей и их сварных соединений позволили установить роль уровня нагружения, его частоты и формы цикла, скорости деформирования, выдержки под нагрузкой и пауз в нагружении в морской воде и на воздухе. Опыты проведены на образцах из сталей стойких и склонных к коррозионному растрескиванию.

Представленные ниже исследования проведены в основном на базе работ [8-10], выполненных в Отделе морской коррозии ФМИ НАН Украины и продолженных на кафедре «Технология материалов» ОНМУ [11-13]. Накопленный в течение многих лет большой объем исследований коррозионно-механической прочности судостроительных материалов в природной морской воде до сих пор требует дополнительного исследования, анализа и обсуждения.

При одновременном действии на металл коррозионно-агрессивных сред и длительного статического нагружения наблюдается явление хрупкого разрушения материала, имеющее название коррозионной статической усталости или, чаще всего, коррозионного растрескивания [14]. Коррозионное растрескивание происходит при действии напряжений, вызванных как внешним нагружением, так и остаточными растягивающими напряжениями, возникновение которых связано с технологией их изго-

товлення (штамповка, гибка, протягивание, развальцовка и т.п.). Термообработка и сварка, вызывающие остаточные растягивающие напряжения, также вызывают коррозионное растрескивание стали. Коррозионное растрескивание развивается во времени: чем больше время, тем при меньшем нагружении разрушается сталь.

В зависимости от агрессивности среды и свойств металла могут рассматриваться две принципиально отличные системы «металл-раствор»: со склонностью материала к коррозионному растрескиванию и без неё. Очевидно, если такая система располагает условиями для коррозионного растрескивания при статической нагрузке, то и в процессе малоциклового нагружения при благоприятных обстоятельствах также может происходить коррозионное растрескивание под действием статической составляющей циклически прилагаемой нагрузки.

В зависимости от условий протекания коррозионного растрескивания в течение малоциклового коррозионной усталости разрушение металлического образца наступает по одной из следующих трех причин. При совершенно благоприятных для коррозионного растрескивания условиях разрушение может совершиться в течение первого же нагружения, очевидно, вследствие коррозионного растрескивания. При полном отсутствии условий для коррозионного растрескивания причиной разрушения является усталость. И, наконец, могут возникнуть такие обстоятельства, когда разрушение циклически деформируемого образца будет обусловлено обоими процессами – усталостью и коррозионным растрескиванием. Последнее должно быть особенно заметным в течение часто встречающихся при повторно-статическом нагружении, выдержек напряженного образца, а также при малоциклового усталости в области низких частот нагружения. В этой связи при изучении малоциклового коррозионной усталости целесообразно учитывать наличие или отсутствие в системе «металл-раствор» условий для коррозионного растрескивания.

Для исследования вклада коррозионного растрескивания в процесс малоциклового разрушения конструкционных материалов в коррозионной среде проводились испытания [8] ряда сталей на коррозионное растрескивание и малоциклового усталость как в морской воде, так и в различных жидких средах с разной агрессивностью по отношению к коррозионному растрескиванию. Испытания на малоциклового усталость отнулевым циклом с жестким нагружением чистым изгибом проводились на машинах типа ИП и ММИ [8] в широком диапазоне частот, в том числе при низких и весьма низких частотах нагружения (1670 – 0,00835 мГц).

**Объектом исследования** были термически улучшаемые хромоникелемолибденовые стали типа 15ХНЗДМ, 12ХНДМФ и 15ХН5ДМФ с пределом текучести соответственно 900, 1000 и 1400 МПа. Эти стали нашли широкое применение в судостроении и обладают высокой стойкостью против коррозионного растрескивания – кольцевые образцы в морской воде не растрескались в течение 2 лет, при деформации соответствующей пределу текучести при изгибе на стенде КР-1 образцы в мор-

скої воді не розрушилися в течение  $2 \cdot 10^4$  час. Для порівняння була також випробувана сталь типу 30ХГСА, закалена на мартенсит ( $\sigma_{0,2} = 1900$  МПа), схильна в певних умовах до корозійного растрескивання.

Зразки зі сталей 15ХН5ДМФ, 15ХН3ДМ, 12ХН4ДМФ гладкі і з концентратором напруження піддавали малоцикловою навантаженню отнульовим чистим вигином при двох рівнях деформації  $\varepsilon = 0,5\%$  і  $\varepsilon = 1,25\%$  [10]. Встановлено, що в природній морській воді зниження частоти малоциклового навантаження в усьому діапазоні досліджуваних частот приводить до зменшення довговічності (по числу циклів) всіх досліджуваних сталей (рис. 1).

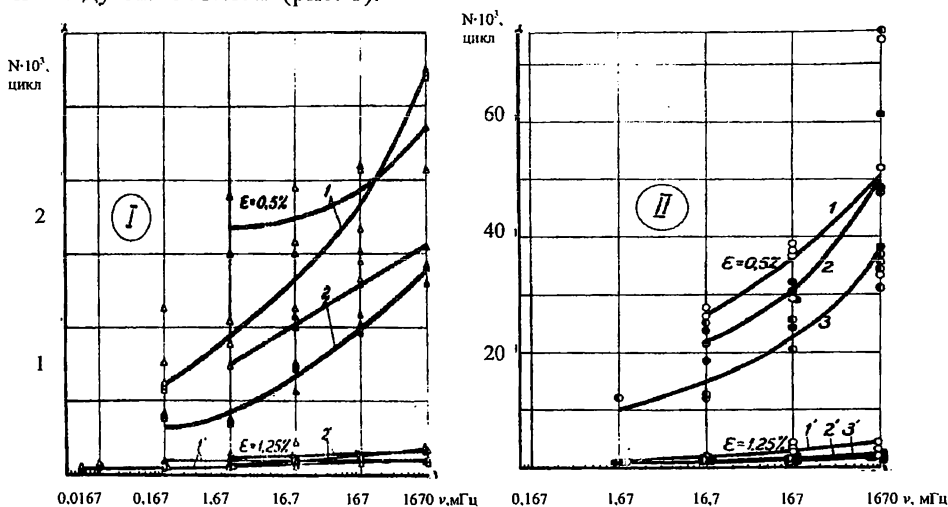


Рис. 1. Частотна залежність малоциклової довговічності (в циклах до руйнування) сталей 15ХН5ДМФ (1, 1'), 15ХН3ДМ (2, 2') і 12ХН4ДМФ (3, 3') при  $\varepsilon = 0,5\%$  (криві 1, 2, 3) і  $\varepsilon = 1,25\%$  (криві 1', 2', 3'),

▲ ● – морська вода, воздух, Δ ○ – воздух;

I – зразки з концентрацією напружень; II – гладкі зразки

Указанная закономірність виявилася не тільки в достаточному хорошо раніше дослідзованому діапазоні частот (1670 – 16,7 МГц), но і при малоізнаних низких (16,7 – 0,167 МГц) і дуже низких (0,167 МГц – 0,00835 МГц) частотах навантаження. Зниження частоти навантаження на повітрі викликає не столь інтенсивне зменшення довговічності, як в морській воді. Збільшення рівня циклічного деформування приводить до ослабленню впливу частоти на довговічність, концентрація напруження діє аналогічним способом.

Поскольку речь идет о малоциклової усталості в корозійній середі, а вплив останньої визначається продовжителістю випробувань, результати експериментів представлялись, крім того, в формі частотної залежності довговічності во времени до руйнування. Если при

снижении частоты нагружения число циклов уменьшается, то долговечность во времени, наоборот, возрастает, причем в гораздо большей степени, чем в первом случае.

**Цель исследования.** Следует отметить, что продолжительность исследований для получения одной кривой частотной зависимости стали 15ХН5ДМФ (образцы с концентрацией напряжений) в морской воде (рис. 1, кривая 1) потребовалось 645 суток чистого машинного времени. В современных условиях проведение такого рода исследований затруднительно. В настоящей статье сделана попытка сократить объем исследований, которые позволяют получить с достаточной точностью аналогичную информацию частотной зависимости при испытании малого числа образцов за короткий промежуток времени. В качестве примера взяты результаты испытаний вышеупомянутых образцов из стали 15ХН5ДМФ в количестве 23 штук [10].

**Статистическая обработка.** Результаты усталостных испытаний подвергались статистической обработке методом корреляционного анализа. На основании проведенных исследований получено, что кривые частотной зависимости малоциклового долговечности в двойных логарифмических координатах представляют собой отрезки прямых, для которых можно составить линейное корреляционное уравнение. Применяв указанный метод, составляли уравнения, выражающие зависимость между временем и частотой малоциклового нагружения.

$$\lg \tau = A - K \lg v. \quad (1)$$

В уравнении (1)  $A$  и  $K$  – постоянные, определяемые свойствами материала и условиями эксперимента, в данном случае средой и уровнем циклической деформации. Постоянная  $K$  равна тангенсу угла наклона описываемой уравнением (1) прямой к оси абсцисс.

$$K = \operatorname{tg} \varphi. \quad (2)$$

В случае отсутствия влияния частоты на долговечность такая прямая представляет собой линию пересчета числа циклов на время испытания, которая наклонена к оси абсцисс под углом  $\beta$ , равным  $45^\circ$ . Очевидно, степень влияния частоты может быть оценена отклонением от линии «пересчета», т.е. углом  $\alpha$ .

$$\alpha = \beta - \varphi. \quad (3)$$

Обозначив  $\lg \tau = x$  и  $\lg v = y$ , уравнение частотной зависимости  $\lg \tau = A - K \lg v$  запишется в следующем виде:

$$x - \bar{x} = \frac{M_{11}}{\sigma_v^2} (y - \bar{y}), \quad (4)$$



где  $x - \bar{x}$  и  $y - \bar{y}$  представляют собой отклонения экспериментальных данных от их среднеарифметических;  $M_{11}$  – центральный момент;  $\sigma_v$  – среднеквадратичное отклонение. Зависимость (4) представляет собой уравнение прямой, проходящей через центр распределения, точку  $M(\bar{x}; \bar{y})$ . Обозначив  $u = x - \bar{x}$  и  $V = y - \bar{y}$ , а также введя коэффициент корреляционного уравнения  $\rho = \frac{M_{11}}{\sigma_v^2}$ , соотношение (4) переписывается

$$U = \rho \cdot V. \quad (5)$$

Параметры корреляционного уравнения подсчитывали по экспериментальным данным (табл. 1 для прямой 1 на рис. 2) для стали 15ХН5ДМФ. Во втором столбце таблицы представлены результаты долговечности образцов в минутах, в четвертом столбце – частота нагружения (цикл/мин.).

При делении алгебраических сумм результатов эксперимента на число испытаний получаем средние значения

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{68,5654}{23} = 2,9811 \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{-25,9030}{23} = -1,1262. \quad (7)$$

В столбцах 7 и 9 представлены отклонения экспериментальных данных от их средних значений, подсчитанных по формулам (6), (7), в столбцах 6 и 10 – квадраты этих отклонений, а в столбце 8 – их произведения.

На основании итоговых данных таблицы 1 вычисляются:

1) дисперсии (среднеквадратичные отклонения)

$$\sigma_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{63,7391}{23} = 2,7712; \quad \sigma_u = \sqrt{2,7712} = 1,664;$$

$$\sigma_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{67,5175}{23} = 2,9355; \quad \sigma_v = \sqrt{2,9355} = 1,714;$$

*Таблиця 1*

*Данные для подсчета параметров корреляционного уравнения прямой 1*

Сталь марки 15ХН5ДМФ, образцы с надрезом, $\epsilon = 1,25\%$ морская вода									
Номер	$\tau$ , мин.	$x = \lg \tau$	$v$ , цикл./ мин.	$y = \lg v$	$U_2$	$U =$ $= x - \bar{x}$	$U - V$	$V =$ $= y - \bar{y}$	$V_2$
1	1,15	0,0607	100,0	2,0000	8,5287	-2,9204	-9,1298	3,1262	9,7731
2	1,09	0,0374	100,0	2,0000	8,6653	-2,9437	-9,2026	3,1262	9,7731
3	6,50	0,8129	10,0	1,0000	4,7010	-2,1682	-4,6100	2,1262	4,5207
4	10,00	1,0000	10,0	1,0000	3,9247	-1,9811	-4,2122	2,1262	4,5207
5	12,00	1,0792	10,0	1,0000	3,6172	-1,9019	-4,0438	2,1262	4,5207
6	68,00	1,8325	1,0	0,0000	1,3192	-1,1486	-1,2935	1,1262	1,2683
7	79,00	1,8976	1,0	0,0000	1,1739	-1,0835	-1,2202	1,1262	1,2683
8	90,00	1,9542	1,0	0,0000	1,0545	-1,0269	-1,1565	1,1262	1,2683
9	490,00	2,6902	0,1	-1,0000	0,0846	-0,2909	-0,0367	0,1262	0,0159
10	575,00	2,7597	0,1	-1,0000	0,0490	-0,2214	-0,0279	0,1262	0,0159
11	600,00	2,7782	0,1	-1,0000	0,0411	-0,2029	-0,0256	0,1262	0,0159
12	615,00	2,7889	0,1	-1,0000	0,0369	-0,1922	-0,0242	0,1262	0,0159
13	770,00	2,8865	0,1	-1,0000	0,0089	-0,0946	-0,0119	0,1262	0,0159
14	4565,00	3,6595	0,01	-2,0000	0,4602	0,6784	-0,5928	-0,8738	0,7635
15	4620,00	3,6646	0,01	-2,0000	0,4671	0,6835	-0,5972	-0,8738	0,7635
16	5760,00	3,7604	0,01	-2,0000	0,6073	0,7793	-0,6809	-0,8738	0,7635
17	32340,00	4,5137	0,001	-3,0000	2,3488	1,5326	-2,8718	1,8738	3,5111
18	51085,00	4,7083	0,001	3,0000	2,9832	1,7272	3,2364	1,8738	2,5111
19	55680,00	4,7457	0,001	-3,0000	3,1138	1,7646	-3,3065	-1,8738	3,5111
20	70080,00	4,8656	0,001	-3,0000	3,4763	1,8645	-3,4937	-1,8738	3,5111
21	187080,00	5,2720	0,0005	-3,3010	5,2482	2,2909	-4,9822	-2,1748	4,7298
22	238940,00	5,3783	0,0005	-3,3010	5,7465	2,3972	-5,2134	-2,1748	4,7298
23	275040,00	5,4393	0,0005	-3,3010	6,0427	2,4582	-5,3461	-2,1748	4,7298
$\sum_{i=1}^n =$	928807,74	68,5654		-25,9030	63,7391		-65,3159		67,5170

2) центральный момент

$$M_{11} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i V_i}{n} = \frac{-65,3159}{23} = -2,8398;$$

3) коэффициент корреляции

$$r = \frac{M_{11}}{\sigma_u \sigma_v} = \frac{-2,8398}{1,664 \cdot 1,714} = -0,9957;$$

4) средняя ошибка коэффициента корреляции

$$\sigma = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} = \frac{1-0,9914}{23} = 0,0018;$$

5) коэффициент корреляционного уравнения

$$\rho = \frac{M_{11}}{\sigma_v^2} = \frac{-2,8398}{2,9355} = -0,9674;$$

6) средняя ошибка корреляционного уравнения

$$S_u = \sigma_u \sqrt{1-r^2} = 1,664 \cdot \sqrt{1-0,9914} = 0,1542.$$

Координаты центра распределения

$$M(\bar{x}; \bar{y}) = M_1(2,9811; -1,1262).$$

Теперь, используя вышеприведенное корреляционное уравнение (5), построим теоретическую линию регрессии  $\tau = f(v)$ . Для этого найдем координаты двух любых точек этой прямой:

а) при  $v = 0,001$  цикл/мин,  $y = -3,00$ ,  $V = -1,8738$ ,  $U = \rho V = -0,9674 \cdot (-1,8783) = 1,8127$ ; ордината  $x = U + \bar{x} = 1,8127 + 2,9811 = 4,7938$ ;

б) при  $v = 10$  цикл/мин,  $y = 1,00$ ,  $V = 2,1262$ ,  $U = \rho V = -0,9674 \cdot (2,1262) = -2,0569$ ; ордината  $x = U + \bar{x} = -2,0569 + 2,9811 = 0,9242$ .

Таким образом, при частоте 0,001 цикл/мин. прямая частотной зависимости проходит через точку  $A(4,7938; -3,00)$  соответствующую долговечности  $\tau = 62210$  мин., а при частоте 10 цикл/мин. – через точку  $B(0,9242; 1,00)$ , соответствующую долговечности  $\tau = 1,033$  мин. Проведя через точки  $A, B$  линию, получим прямую 1 частотной зависимости (см. рис. 2).

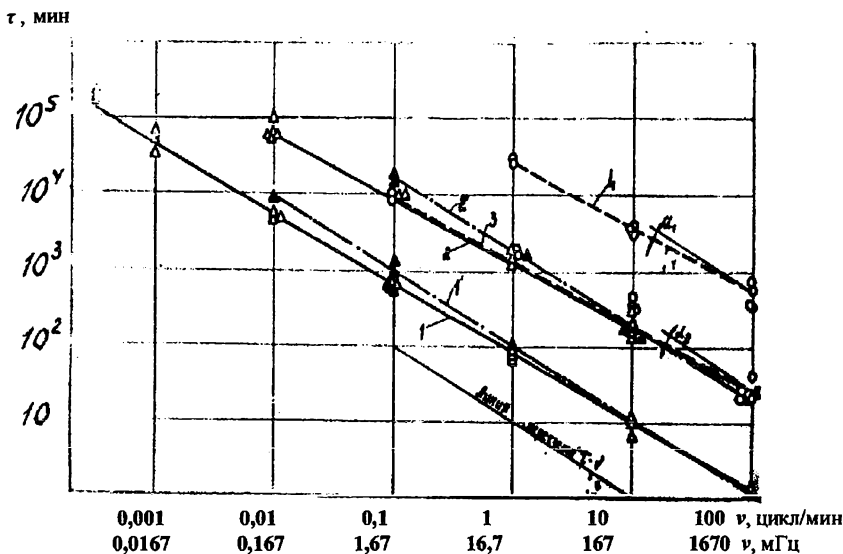


Рис. 2. Зависимость долговечности во времени до разрушения от частоты малоциклового нагружения стали типа: 15ХН5ДМФ на воздухе ( $\blacktriangle$ ) и в морской воде ( $\Delta$ ,  $\bullet$ ) при  $\epsilon = 1,25\%$  (кривые 1, 1', 3) и  $\epsilon = 0,5\%$  (кривые 2, 2', 4),  $\bullet$  – образцы гладкие;  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – образцы с концентратором напряжения

Если она построена правильно, линия пройдет через центр распределения  $M_1(2,9811; -1,1262)$ .

Так как зависимость между  $\nu$  и  $\tau$  подчиняется нормальному закону распределения, согласно с оценкой плотности попадания случайных величин в данный интервал, можно сделать следующие выводы. Долговечность не менее 68,3 % образцов имеют отклонения от прямой частотной зависимости  $S_u = 0,1542$ . Отклонения от построенной на основании принятого метода закономерности  $\lg \tau = f(\lg \nu)$  на величину  $2S_u = 0,3084$  имеют 95,4 % испытанных образцов и, наконец, в интервал со средним отклонением  $3S_u = 0,4626$  попадают результаты испытаний практически всех образцов (99,73 %). Аналогичным образом строились теоретические линии регрессии  $\tau = f(\nu)$  остальных кривых (1', 2, 2', 3 и 4) частотной зависимости долговечности стали 15ХН5ДМФ (см. рис. 2) и сталей 15ХНЗДМ и 12ХН4ДМФ [10]. Рассчитанные по формуле (3) углы  $\alpha$  приведены в табл. 2.

Таблиця 2

*Степень влияния частоты нагружения  
в зависимости от амплитуды деформации и среды*

Вид образца	Среда	Относительная деформация $\varepsilon$ , %	Угол $\alpha$		
			сталь типа 15ХНЗДМ	сталь типа 12ХН4ДМФ	сталь типа 15ХН5ДМФ
гладкий	морская вода	0,50	4°04'	5°53'	3°41'
		1,25	4°00'	3°10'	3°17'
с надрезом	морская вода	0,50	5 °27'	–	3°47'
		1,25	4°17'	–	2°30'
с надрезом	воздух	0 50	1°19'	–	1°17'
		1 25	0°43'	–	0°10'

Анализ результатов эксперимента, представленных на рис. 1, 2 и в табл. 2, показывает, что уменьшение частоты деформирования при малоциклового усталости хромоникелемолибденовых сталей на воздухе и в морской воде приводит к снижению долговечности по числу циклов в несколько раз, время до разрушения при этом возрастает на несколько порядков. Из исследованных [10] трех марок каждый тип стали обладает различной чувствительностью к частоте нагружения, как правило, уменьшающейся при переходе от менее прочной стали к более прочной. Увеличение угла  $\alpha$  при переходе от испытаний на воздухе к экспериментам в морской воде и при снижении амплитуды циклической деформации свидетельствует об усилении влияния частоты нагружения на долговечность.

Поскольку исследуемые хромоникелемолибденовые стали в морской воде обладают большой стойкостью к коррозионному растрескиванию (КР), для сравнения была выбрана закаленная на мартенсит с последующим высоким отпуском сталь 30ХГСНА, склонная к коррозионному растрескиванию.

Испытания [8] на малоциклового усталость и коррозионное растрескивание вели в средах с различной агрессивностью по отношению к коррозионному растрескиванию – в естественной морской воде, в 3,5 % водном растворе хлористого натрия, а также в растворе, ускоряющем коррозионное растрескивание (10 % водный раствор  $\text{NaCl} + \text{AlCl}_3 + \text{HCl}$  до рН 3).  $\text{AlCl}_3$  в ускоряющей среде служил буфером, поддерживающим рН среды на уровне 3, что соответствует кислотности в вершине развивающейся трещины [15].

В 3,5 % водном растворе  $\text{NaCl}$  гладкие образцы из стали 30ХГСНА в условиях статического изгиба с деформацией  $\varepsilon = 4,2$  % на стенде КР-1 разрушались от коррозионного растрескивания в течение 7 суток, в морской воде – за 30 суток, в спецрастворе с рН 3 – в течение 10 мин.

Испытания на малоцикловую коррозионную усталость проводились аналогично вышеприведенным испытаниям хромоникелемолибденовых сталей. В 3,5 % растворе хлористого натрия и в морской воде нагружение проводили с амплитудой деформации  $\epsilon = 4,2 \%$ . Для достижения коррозионного растрескивания в ускоряющей среде в течение такого же периода как у образцов, испытанных в 3,5 % растворе NaCl, принята амплитуда деформации  $\epsilon = 0,5 \%$ . Как и для стойких к КР сталей диапазон частот испытания стали 30ХГСНА принимался 1670-0,000835 мГц.

Коррозионное растрескивание определяется временем до разрушения и нагрузкой, поэтому для установления влияния на малоцикловую усталость коррозионного растрескивания результаты экспериментов также представлялись в двойных логарифмических координатах время-частота (рис. 3).

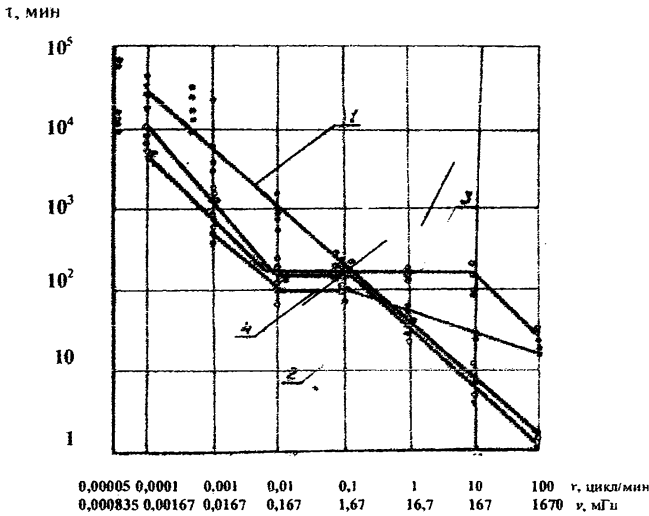


Рис. 3. [8] Зависимость долговечности (во времени до разрушения) стали 30ХГСНА от частоты малоциклового нагружения в морской воде (1), в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание (3, 4) и в 3,5 % водном растворе NaCl (2).  
Образцы гладкие:  $\epsilon = 4,2 \%$  (1, 2, 4),  $\epsilon = 0,5 \%$  (3)

Судя по ходу кривой 1, в природной морской воде в логарифмических координатах долговечность связана с частотой линейной зависимостью, аналогичной полученной при испытании хромоникелемолибденовой стали в морской воде. Последнее позволяет предположить, что в морской воде во всем исследованном диапазоне частот разрушение стали 30ХГСНА наступает от коррозионной усталости. Склонность материала к

коррозионному растрескиванию в морской воде в диапазоне частот 1670 МГц-0,00167 МГц не успела проявиться и лишь при снижении частоты ниже 0,00167 МГц выявлена значительная нестабильность результатов эксперимента; при этом разрушение часто происходило от коррозионного растрескивания при первом же нагружении. Это свидетельствует о преимущественном вкладе коррозионного растрескивания в общий процесс разрушения при весьма низких частотах нагружения.

При испытании в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание, в диапазоне частот от 0,167 МГц-167 МГц ( $\epsilon = 0,5 \%$ ) на кривой 3 отчетливо проступает участок, на котором, независимо от частоты нагружения, время до разрушения остается практически постоянным и определяется склонностью стали к коррозионному растрескиванию (горизонтальный участок кривой 3). В интервале высоких частот (167 МГц-1670 МГц) из-за небольшой продолжительности воздействия среды отмеченное влияние коррозионного растрескивания на усталостный процесс не обнаружено, разрушение в этих случаях происходит только вследствие коррозионной усталости. Повышение уровня циклического деформирования до  $\epsilon = 4,2 \%$  в этой же (ускоряющей) среде, уменьшая долговечность образца, приводит, кроме того, к сокращению пологого участка, связанного с влиянием на усталостный процесс коррозионного растрескивания, и к увеличению диапазона частот (1670 МГц-1,67 МГц), при которых разрушение наступает от усталости (кривая 4). Очевидно, в последнем случае из-за недостатка времени при частотах 1670 МГц-167 МГц склонность стали к коррозионному растрескиванию не успела проявиться и обнаруживается лишь при частотах ниже 1,67 МГц.

В 3,5 % растворе NaCl в диапазоне частот 1670 МГц-1,67 МГц, как и в естественной морской воде, долговечность образцов находится во временной зависимости от частоты нагружения (кривая 2). Так как в 3,5 % растворе хлористого натрия склонность стали к коррозионному растрескиванию незначительна, действие последней на усталостный процесс не столь заметно, как в ускоряющей среде. Тот факт, что в диапазоне частот 1670 МГц-1,67 МГц долговечность в синтетической и природной морской воде практически совпадает, несмотря на различную коррозионную агрессивность сред, указывает на преимущественно усталостный характер процесса в этих условиях малоциклового нагружения. При более низких (менее 1,67 МГц) частотах нагружения в синтетическом аналоге морской воды коррозионное растрескивание сокращает долговечность образцов.

Анализ правых участков кривых 1-4 позволяет прийти к выводам, аналогичным тем, которые были сделаны в ходе испытаний хромоникелемолибденовых сталей (в условиях отсутствия коррозионного растрескивания). Как и в первом случае, долговечность стали 30ХГСНА связана с частотой нагружения линейной зависимостью. Увеличение угла  $\alpha$ , образованного правыми ветвями кривых и линией «пересчета» при переходе от менее агрессивной среды к более агрессивной, свидетельствует об уси-

лени «эффекта частоты». В диапазоне частот 16,7 мГц-1670 мГц долговечность стали в среде с рН 3 оказалась выше, чем в морской воде и в 3,5 % растворе NaCl. И хотя такая среда более агрессивна в отношении коррозионного растрескивания, тем не менее, в условиях высокочастотного деформирования агрессивность среды не успела проявиться, а адсорбционное и коррозионное влияние ее на усталость, по-видимому, слабее, чем охлаждающее, действующее в обратном направлении [4].

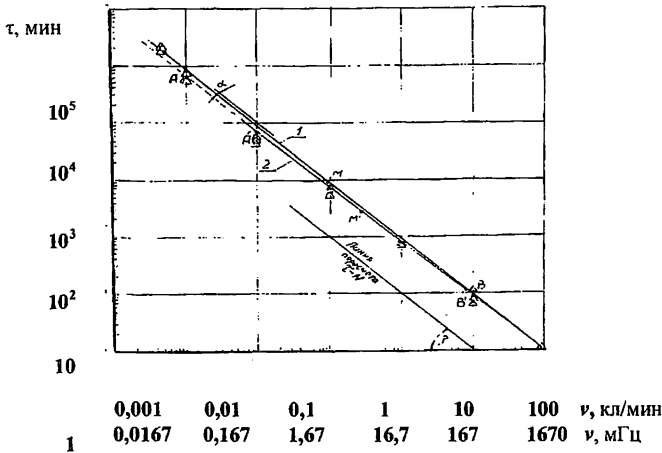
При частоте 16,7 мГц (близкой к обычно применяемой при малоцикловых испытаниях) и уровне циклической деформации  $\epsilon = 4,2\%$  долговечность образцов в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание, приближается к долговечности в морской воде и в 3,5 % растворе NaCl. В средах с различной агрессивностью по отношению к коррозионному растрескиванию разрушение совершается приблизительно за одинаковый промежуток времени, очевидно, металл не успел проявить склонности к КР и разрушился от усталости.

Наоборот, при частотах менее 0,167 мГц долговечность образцов в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание, на порядок ниже долговечности в морской воде, что свидетельствует о решающем влиянии на усталостный процесс коррозионного растрескивания под действием среды и статической составляющей циклически прикладываемой нагрузки. В 3,5 % растворе NaCl, в среде относительно слабой по отношению к коррозионному растрескиванию, левая ветвь кривой 2 занимает промежуточное положение между кривыми, построенными в морской воде и в среде с рН 3.

**Результаты исследований.** На основании проведенных исследований установлено, что при малоцикловом нагружении в коррозионной среде в отсутствие коррозионного растрескивания происходит усталостное разрушение образцов. В этом случае долговечность во времени до разрушения связана с частотой временной зависимостью и в логарифмических координатах представляет собой наклонную прямую, характеризующую увеличение долговечности во времени пропорционально уменьшению частоты. Если же в системе «металл-раствор» имеет место коррозионное растрескивание, то в определенном диапазоне частот на указанной прямой  $lgt = f(lgv)$  появляется пологий участок, смещающий кривую частотной зависимости в область меньшей долговечности.

С целью поиска возможности сокращения времени исследований для получения частотной зависимости малоцикловой долговечности с достаточным уровнем достоверности для сталей, стойких к коррозионному растрескиванию, мы построили теоретическую линию регрессии  $\tau = f(\nu)$  при испытании 6 образцов из стали 15ХН5ДМФ (см. рис. 4) и сравнили ее с кривой 1 (рис. 2), полученной на основании испытания 23 образцов.





*Рис. 4. Частотная зависимость малоциклового долговечности образцов из стали 15ХН5ДМФ: на основании испытаний 23 образцов – кривая 1 и 6 образцов – кривая 2;  $\varepsilon = 1,25\%$ , морская вода*

Отметим, что испытания 23 образцов длились 645 суток, а 6 образцов – менее 11 суток (см. табл. 3). После статистической обработки методом корреляционного анализа, аналогично описанному выше, были получены данные для подсчета параметров корреляционного уравнения кривой при испытании 6 образцов (табл. 3) и построена прямая 2 частотной зависимости в сравнении с прямой 1, полученной при испытании 23 образцов (см. рис. 4). Координаты точек прямой 2: при частоте 0,01 цикл/мин. точка  $A(3,6947; -2,0000)$ , а при частоте 10 цикл/мин. – точка, центр распределения  $M'(2,3294; -0,5000)$ .

Как видно из рис. 4, расположение кривой 2 лежит в пределах разброса экспериментальных точек кривой 1, т.е. с достаточным уровнем достоверности полученные данные для кривой 2 можно применить и для более низких частот, пролив кривую 2 в область весьма низких частот.

**Выводы.** Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Полученные данные позволяют прогнозировать долговечность исследуемого материала при весьма низких частотах нагружения, не проводя такие дорогостоящие и длительные испытания при этих частотах. Для этого достаточно провести испытания при нескольких (двух-трех) достаточно высоких частотах малоциклового нагружения. Проведя статистическую обработку результатов эксперимента и построив прямую частотной зависимости малоциклового долговечности, можно определить параметры  $A$  и  $K$  уравнения (1). Это позволяет рассчитать малоцикловую долговечность исследуемого материала при частотах более низких, чем применяемые при испытаниях.

Таблица 3

Данные для подсчета параметров корреляционного уравнения прямой 2 (ускоренные испытания)

Сталь марки 15ХН5ДМФ, образцы с надрезом, $\epsilon = 1,25\%$ морская вода										
№	$t, \text{мин}$	$x = \lg \tau$	$y, \text{цикл/мин}$	$y = \lg v$	$U^2$	$U = x - \bar{x}$	$U - V$	$V = y - \bar{y}$	$V^2$	$U^2$
1	6,50	0,8129	10,0	1,0000	2,2997	-1,5165	-2,2747	1,5000	2,25	2,25
2	10,00	1,0000	10,0	1,0000	1,7673	-1,3294	-1,9941	1,5000	2,25	2,25
3	12,00	1,0792	10,0	1,0000	1,5630	-1,2502	-1,8753	1,5000	2,25	2,25
4	4565,00	3,6595	0,01	-2,0000	1,7691	1,3301	-1,9951	-1,5000	2,25	2,25
5	4620,00	3,6646	0,01	-2,0000	1,7827	1,3352	-2,0028	-1,5000	2,25	2,25
6	5760,00	3,7604	0,01	-2,0000	2,0477	1,4310	-2,1465	-1,5000	2,25	2,25
$\sum_{i=1}^n =$	14973,50	13,9766		-3,0000	11,2295		-12,2885		13,50	

2. Однако следует учитывать, что уравнение (1) справедливо только при усталостном разрушении материала, стойкого против коррозионного растрескивания, в условиях же вызывающих склонность материала к коррозионному растрескиванию при малоцикловом нагружении, применение уравнения (1) возможно только в ограниченном диапазоне частот.

3. Для прогнозирования малоцикловой долговечности материала при весьма низких частотах помимо малоцикловых испытаний с высокой частотой необходимо предварительно дополнительно исследовать склонность материала к коррозионному растрескиванию в рабочей (агрессивной) среде.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чудновский А.Д. Влияние частоты повторных нагружений на сопротивление разрушению конструкционных сталей / А.Д. Чудновский // Сб. «Исследование прочности сталей при циклических нагружениях в упруго-пластической области»: Труды ЦНИИТМАШ. – 1967. – № 109. – С. 109-116.
2. Бродский А.Д. Краткий справочник по математической обработке результатов измерений / А.Д. Бродский, В.Л. Кан. – М.: Гос. изд. Стандартов, 1960. – 168 с.
3. Быков В.А. Пластичность, прочность и разрушение металлических судостроительных материалов / В.А. Быков // Л.: Судостроение, 1974. – 216 с.
4. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде / Г.В. Карпенко: Монография. – М.-К.: Машиз, 1963. – 187 с.
5. Callame B. Interferese des facteurs physique-chemigues et biologiques de la corrosion on milien marin / B. Callame // Peintures, pigments, vernis. – 1968. – 44, 10. – P. 602-604.
6. Todd B. Factors in the choice of Materials for Marine Engineering / B. Todd // Transactions of the Marine Engineering. – 1968. – V. 80. – № 6. – P. 161-179.
7. Лагутина А.Г. Изучение коррозии судостроительных материалов в морской воде / А.Г. Лагутина, К.П. Данильченко, О.Ф. Шевченко, В.П. Баранник // Защита металлов. – 1970. – № 1. – Т. 6. – С. 48-51.
8. Кобзарук А.В. Морская коррозия металлов в напряженном состоянии / А.В. Кобзарук: Монография. – Одесса, 2014. – 256 с.
9. Исследование коррозионной и корозионно-механической стойкости судостроительных материалов: Отчет по теме «Резерв 4.4» Физико-механического института АН УССР. – Одесса-Львов. – 1980. – 130 с.

10. Кобзарук А.В. Влияние частоты нагружения на долговечность стали в морской воде при малоцикловой усталости /А.В. Кобзарук // Физико-химическая механика материалов. – № 2. – 1975. – С. 98-100.
11. Кобзарук А.В. Эффект масштаба при малоцикловой усталости в морской воде /А.В. Кобзарук // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Вып. № 11. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 2003. – С. 221-226.
12. Кобзарук А.В. Стационарный электродный потенциал стали в морской воде в зависимости от частоты и формы цикла малоциклового нагружения / А.В. Кобзарук, А.И. Сабуров, Б.В. Смажило // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Вып. № 30. – Одеса: Вид-во ОДМУ, 2010. – С. 177-187.
13. Кобзарук А.В. Исследования сопротивления малоцикловой усталости конструкционной судостроительной стали в зависимости от частоты и формы цикла нагружения / А.В. Кобзарук, А.И. Сабуров, Б.В. Смажило // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Вып. № 47. – Одеса: Вид-во ОДМУ, 2014. – С. 177-187.
14. Карпенко Г.В. Коррозионное растрескивание сталей / Г.В. Карпенко, В.И. Василенко: Монография. – К.: Техника, 1971. – 192 с.
15. Baker H.R. The Effect of some Electrelutes on the stress corrosion cracking of AISI 4340 Steel / H.R. Baker, C.R. Singletery // Corrosion (USA). – 1972. – V. 28. – № 9. – P. 340-344.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2017

#### Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машинознавство» Одеського національного морського університету  
**А.В. Конопльов**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету  
**В.П. Сторожев**

УДК 629.58:678:539.4

С.Ф. Присташ, Є.Т. Бурдун

### МЕТОД РОЗРАХУНКУ МІЦНОГО КОРПУСУ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ В ФОРМІ ТОРУ, ВИКОНАНОГО НАМОТУВАННЯМ

*Розроблено метод розрахунку напружено-деформованого стану ортотропного тороїдального міцного корпусу, що виготовлений поперечною намоткою в комбінації з поздовжньою намоткою або викладкою із полімерного композиційного матеріалу при гідростатичному стисканні. Враховано зміну товщини оболонки по меридіану тороїдальної оболонки, що обумовлено геометрією оболонки та технологією її виготовлення. Адекватність методу перевірена співставленням числових результатів з раніш отриманим рішенням для ізотропної тороїдальної оболонки постійної товщини та проаналізовано збіжність отриманих результатів.*

**Ключові слова:** тороїдальний міцний корпус, змінна товщина оболонки, напружено-деформований стан, намотування, збіжність методу розрахунку.

*Разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния ортотропного тороидального прочного корпуса изготовленного поперечной намоткой в комбинации с продольной намоткой или выкладкой из полимерного композиционного материала при гидростатическом сжатии. Учтено изменение толщины вдоль меридиана тороидальной оболочки, которая обусловлена геометрией оболочки и технологией ее изготовления. Адекватность метода проверена сопоставлением числовых результатов с ранее полученным решением для изотропной тороидальной оболочки постоянной толщины и проанализирована сходимость полученных результатов.*

**Ключевые слова:** тороидальный прочный корпус, переменная толщина оболочки, напряженно-деформированное состояние, намотка, сходимость метода решения.

*The method of evaluation of stressed-deformed state of orthotropic toroidal pressure hull, produced by transverse winding in combination with longitudinal winding from polymer composite material in conditions of hydrostatic compression is developed. The change in thickness of toroidal casing meridian, caused by casing geometry and production technology, is taken into account. Adequacy of proposed method is verified by comparison of results with solution for toroidal casing with constant thickness, obtained earlier, and convergence of results is analyzed on the ample of isotropic toroidal casing.*

**Keywords:** pressure hull variable thickness, stressed-deformed state, winding, evaluation convergence.

**Постановка проблеми.** Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) перспективно в конструкціях міцних корпусів підводних технічних засобів. Так, використання ПКМ дозволяє відчутно зменшити масу конструкції корпусу, що разом з достатніми фізико-механічними характеристиками дозволяє отримати матеріал з питомими міцністю та жорсткістю, що значно перевищує аналогічні показники високоміцної сталі [1].

Міцні корпуси підводних технічних засобів зазвичай мають форму тонкостінного круглого циліндра, конуса або купола. В світлі сучасних тенденцій до ефективних форм міцних корпусів можна віднести тороїдальну форму [2-4]. Ефективніше всього виготовляти тороїдальні міцні корпуси із ПКМ методом намотування волокном або стрічкою. Намотування дозволяє виготовити виріб майже будь-якого розміру зі збереженням геометричної форми близької до ідеального тору, що задається геометрією технологічного оснащення, і важливо з позиції стійкості корпусу при гідростатичному стисканні, та дозволяє максимально реалізувати показники фізико-механічних характеристик односпрямованих волокнистих ПКМ. Намотування реалізує високий коефіцієнт заповнення об'єму (КЗО) волокном (до 70 %). Так, на тороїдальних оболонках методом безперервного намотування волокном можна реалізувати поперечну намотку в комбінації з поздовжньою намоткою (або викладкою) (рис. 1, а) та спіральну геодезичну (або урівноважену) намотку (рис. 1, б), де  $a$  – внутрішній радіус перерізу меридіана;  $R$  – відстань від вісі обертання до центру меридіального перерізу;  $r_0$  – максимальний радіус обертання (на зовнішньому екваторі);  $r$  – відстань від вісі обертання  $\psi$  до деякої точки  $K(\theta)$  серединної поверхні у меридіанному перерізі;  $\pm\phi$  – кути спіральної намотки

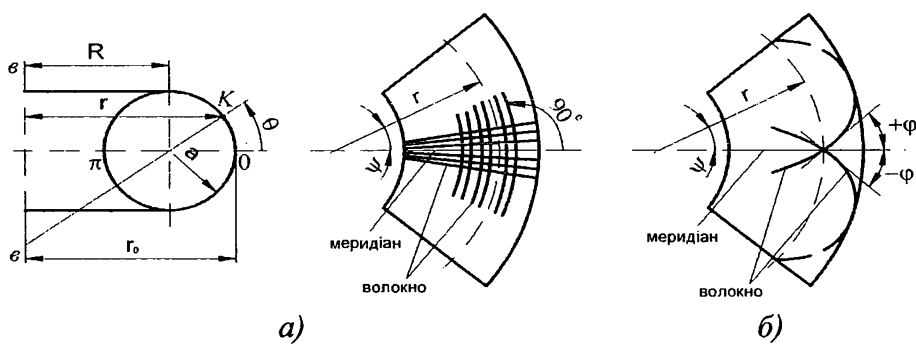
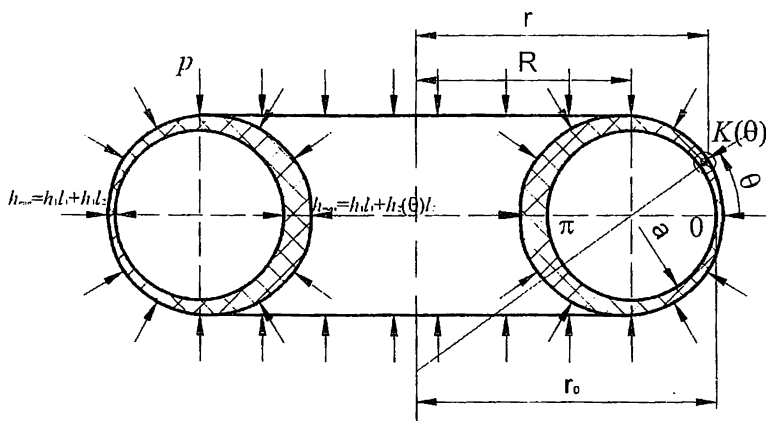


Рис. 1. Геометричні розміри та схеми намотування кругової тороїдальної оболонки:  
а) поперечна намотка в комбінації з поздовжньою намоткою або викладкою;  
б) спіральна намотка

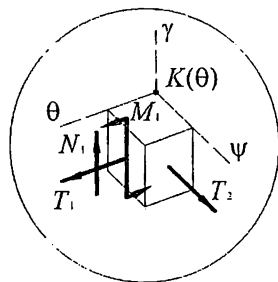
Задача стійкості ортотропної тороїдальної оболонки, у тому числі зі змінною по меридіану товщиною виконаної намотуванням вирішена автором [5]. Проте немає робіт, присвячених дослідженню впливу зміни товщини в перерізі тора при різних структурних схемах намотування на напружено-деформований стан тороїдальної оболонки, що складає новий напрямок в реалізації проблеми міцності тороїдальних міцних корпусів.

**Метою статті** являється побудова методу визначення напружено-деформованого стану композиційних тороїдальних міцних корпусів підводних технічних засобів з урахуванням змінної товщини при поперечному намотуванні в комбінації з повздовжньою намоткою або викладкою та оцінка збіжності рішень методу.

**Виклад основного матеріалу.** В якості міцного корпусу підводно-технічного засобу розглядається ортотропна тороїдальна оболонка (рис. 2), виготовлена із ПКМ.



a)



b)

Рис. 2. Геометричні параметри діаметрального перерізу тороїдальної оболонки змінної товщини (а) та напружений стан в точці типу  $K(\theta)$  (б)

При виготовленні тороїдальної оболонки намоткою в комбінації з поздовжньою намоткою (або викладкою) кожен поперечний моношар (загальна кількість шарів  $l_2$ ) буде мати змінну товщину  $h_2(\theta)$  за рахунок більш щільного вкладання на внутрішньому екваторі оболонки [6]

$$h_2(\theta) = h_1 \frac{1+k}{1+k \cos \theta}, \quad (1)$$

де  $h_1 = h_{\text{прод}} = \text{const}$  – товщина поздовжнього моношару в пакеті (загальна кількість шарів  $l_1$ ), яка рівна товщині армуючого волокна (стрічки).

При такому намотуванні формується в цілому ортогонально армований композиційний матеріал, та тороїдальна оболонка далі розглядається як ортотропна зі змінною товщиною.

Напружено-деформований стан замкненої тороїдальної оболонки змінної товщини під дією рівномірно розподіленого зовнішнього тиску  $p$  [Па] розглядається як вісесиметрична задача (по координаті  $\psi$ ). Система рівнянь рівноваги для вісесиметричної задачі (рис. 2) ортотропної тороїдальної оболонки для т. А( $\theta$ ) має вигляд [7]

$$\begin{cases} \frac{\partial BT_1}{\partial \theta} + ABk_1 N_1 = 0 \\ -(k_1 T_1 + k_2 T_2) + \frac{1}{AB} \frac{\partial BN_1}{\partial \theta} = p \end{cases}, \quad (2)$$

де  $A = \frac{a}{k}(1 + k \cos \theta)$  і  $B = a$  – коефіцієнти Ламе для тороїдальної поверхні;

$k = \frac{a}{R}$  – геометричний параметр форми тора;

$k_1, k_2$  – головні кривизни;

$N_1, T_1, T_2$  – погонні зусилля.

В формулі (1) та наступних індекси 1 і 2 відповідають двом криволінійним координатам  $\psi$  і  $\theta$  відповідно.

В основі теорії згинання тонких оболонок прийнята гіпотеза прямих нормалей, за якою точки, що належать нормалі до серединної поверхні до деформації, залишаються і після деформації лежати на прямій, нормальній до серединної поверхні. Інакше кажучи, в процесі деформації оболонки прямолінійність нормалей декілька порушується: це пов'язано зі зсувами в перерізах, нормальних до серединної поверхні. Тому гіпотеза прямих нормалей зводиться до припущення про те, що зсуви в нормальних перерізах малі в порівнянні з кутами поворотів нормалей і тому деформацією зсуву можна, як правило знехтувати [8].



Геометричні співвідношення мають вигляд

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{A} \frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta} + k_1 \omega(\theta), \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \theta} u(\theta) + k_2 \omega(\theta), \\ \chi_1 &= -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial \omega(\theta)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial k_1}{\partial \theta} \frac{u(\theta)}{A}, \\ \chi_2 &= 0,\end{aligned}\tag{3}$$

де  $u(\theta)$  – тангенціальне переміщення серединної поверхні оболонки вздовж кутової координати  $\theta$ ;

$\omega(\theta)$  – радіальне переміщення по радіусу меридіанного перерізу тора.

Вирази для погонних зусиль та моментів мають вигляд

$$\begin{aligned}N_1 &= \frac{1}{AB} \frac{\partial B M_1}{\partial \theta}, & N_2 &= 0, \\ T_1 &= C_{11} \varepsilon_1 + C_{12} \varepsilon_2, & T_2 &= C_{22} \varepsilon_2 + C_{12} \varepsilon_1, \\ M_1 &= D_{11} \chi_1 + D_{12} \chi_2, & M_2 &= 0,\end{aligned}\tag{4}$$

де  $C_{ij}$ ,  $D_{ij}$  – жорсткості композитної оболонки ( $i, j = 1, 2$ ).

Жорсткості  $C_{ij}$ ,  $D_{ij}$  будуть мати вигляд [9]

$$\begin{cases} D_{11}(\theta) = R_1 h_2^2(\theta) + R_2 h_2(\theta) + R_3 h_2^3(\theta) + R_4 \\ D_{22}(\theta) = R_2 h_2^2(\theta) + R_6 h_2(\theta) + R_7 h_2^3(\theta) + R_8 \\ D_{12}(\theta) = R_9 h_2^3(\theta) + R_{10} h_2^2(\theta) + R_{11} h_2(\theta) + R_{12}, \\ C_{11}(\theta) = R_{13} + R_{14} h_2(\theta) \\ C_{22}(\theta) = R_{15} + R_{16} h_2(\theta) \\ C_{12}(\theta) = R_{17} + R_{18} h_2(\theta) \end{cases}\tag{5}$$

де  $R_f$  ( $f = 1, 2 \dots 18$ ) функція, яка залежить від параметрів, що характеризують структуру намотаної тороїдальної оболонки, та властивостей моношару (армуючої стрічки)

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1}{12} h_1 l_1 [B_{11}(l_1^2 + 3l_2^2) + 2l_1 B_{22}(l_1 + 3l_2) + 2(B_{11} - B_{22})(3l_2 + 1)], \\
 R_2 &= \frac{1}{12} h_1^2 l_1 [2B_{11}l_1^2 + B_{22}l_1^2 + 3l_2 l_1 B_{22} + 2(B_{22} - B_{11})], \\
 R_3 &= \frac{1}{12} B_{22}(l_2 + l_1)^3, \quad R_4 = \frac{1}{12} B_{11} h_1^3 l_1^3, \\
 R_5 &= \frac{1}{12} h_1 l_1 [l_1^2 (2B_{11} + B_{22}) + 3l_2 (2l_1 B_{11} + l_2 B_{22}) + 2(B_{22} - B_{11})(3l_2 + 1)], \\
 R_6 &= \frac{1}{12} h_1^2 l_1 [l_1^2 (B_{11} + 2B_{22}) + 3l_2 l_1 B_{11} + 2(B_{11} - B_{22})], \\
 R_7 &= \frac{1}{12} B_{11}(l_2 + l_1)^3, \quad R_8 = \frac{1}{12} B_{22} h_1^3 l_1^3,
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$R_9 = \frac{1}{12} B_{21}(l_2 + l_1)^3, \quad R_{10} = \frac{3}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^2 l_1 h_1,$$

$$R_{11} = \frac{3}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^2 l_1^2 h_2, \quad R_{12} = \frac{1}{12} B_{12} h_1^3 l_1^3,$$

$$R_{13} = B_{11} h_1 l_1, \quad R_{14} = B_{22}(l_1 + l_2),$$

$$R_{15} = B_{22} h_1 l_1, \quad R_{16} = B_{11}(l_1 + l_2)$$

$$R_{17} = B_{12} h_1 l_1, \quad R_{18} = B_{12}(l_1 + l_2).$$

$$B_{11} = \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, \quad B_{22} = \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}},$$

$$B_{12} = \frac{E_2 \mu_{12}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} = \frac{E_1 \mu_{21}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}. \tag{7}$$

$$E_1 = E_B \eta + (1 - \eta) E_M, \quad E_2 = \frac{E_B E_M}{\eta E_M + (1 - \eta) E_B}. \tag{8}$$

$$\mu_{12} = \mu_B \eta + (1 - \eta) \mu_M, \quad \mu_{21} = \frac{\mu_{12} E_2}{E_1}. \tag{9}$$

Пружні характеристики моношару  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_{12}$  та  $\mu_{21}$  визначаються експериментально або розраховуються за властивостями компонентів по математичним моделям (8) та (9).

Підставляючи значення компонентів деформації з (3) в (4), а потім отримані вирази для внутрішніх зусиль та моментів та вирази (1), (5) в (2) (враховуючи, що жорсткості  $C_{ij}(\theta)$ ,  $D_{ij}(\theta)$  функції від  $\theta$  для розрахунку оболонки змінної товщини), отримуємо рівняння рівноваги в переміщеннях для замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини

$$L_{11}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{12}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w = 0, \quad (10)$$

$$L_{21}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{22}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w = p,$$

де лінійні диференціальні оператори  $L_{ij}$  мають наступний вигляд:

$$L_{11}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) = -D_{11} \frac{k^3 \cos^2 \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^4} - D_{11} \frac{3k^4 \cos \theta \sin^2 \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^5} - D'_{11} \frac{k^3 \cos \theta \sin \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^4} + \\ + C_{11} \frac{k^2 \sin \theta}{(1+k \cos \theta)^2} \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{11} \frac{k^3 \cos \theta \sin \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^4} \frac{\partial}{\partial \theta} + C'_{11} \frac{k}{1+k \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + C_{11} \frac{k}{1+k \cos \theta} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (11)$$

$$L_{12}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) = C_{11} \frac{k \sin \theta}{(1+k \cos \theta)^2} + C'_{11} \frac{k \cos \theta}{1+k \cos \theta} + C'_{12} + C_{12} \frac{\partial}{\partial \theta} + C_{11} \frac{k \cos \theta}{1+k \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} - \\ - D_{11} \frac{k^4 \cos \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^4} (\cos \theta + \frac{3k \sin^2 \theta}{1+k \cos \theta}) \frac{\partial}{\partial \theta} - D'_{11} \frac{k^4 \cos \theta \sin \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^4} \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{11} \frac{3k^4 \cos \theta \sin \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^4} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \\ - D'_{11} \frac{k^3 \cos \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^3} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - D_{11} \frac{k^3 \cos \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^3} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3}$$

$$L_{21}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}D''_{ij}) = D_{11} \frac{k^5 \cos \theta \sin \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^5} (\frac{10k \cos \theta}{1+k \cos \theta} - 1) + D_{11} \frac{k^4 \sin \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^4} - D_{11} \frac{15k^6 \sin^3 \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^7} - \\ - D'_{11} \frac{2k^4 \cos \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^5} - D'_{11} \frac{7k^5 \sin^2 \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^6} - C_{11} \frac{k^2 \cos \theta}{a^2(1+k \cos \theta)^2} \frac{\partial}{\partial \theta} - C_{12} \frac{k}{a^2(1+k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} - \\ - D_{11} \frac{2k^4 \cos \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^5} \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{11} \frac{7k^5 \sin^2 \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^6} \frac{\partial}{\partial \theta} - D'_{11} \frac{2k^4 \sin \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^5} \frac{\partial}{\partial \theta} - D''_{11} \frac{k^4 \sin \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^5} - \\ - D_{11} \frac{k^4 \sin \theta}{a^4(1+k \cos \theta)^5} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

Для замкненої в обох напрямках кругової тороїдальної оболонки рішення повинно задовольняти періодичності відносно кута  $\theta$ , тому знаходиться воно в вигляді [10]

$$\begin{aligned} u(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} u_m \sin(m\theta), \\ w(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} w_m \cos(m\theta). \end{aligned} \tag{12}$$

Для досягнення потрібної точності достатньо утримувати декілька членів ряду для знаходження невідомих коефіцієнтів  $u_m$  та  $w_m$ .

Інтегруючи рівняння рівноваги (10) за методом Бубнова-Гальборкіна [11] по  $\theta$  і  $\psi$  по поверхні тора, приймається до уваги, що елемент площі тору рівен

$$ABd\theta d\psi = \left[ \frac{a^2(1+k\cos\theta)}{k} \right] d\theta d\psi. \tag{13}$$

Після перетворень отримано систему безкінечних лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^M (L_{11m} u_m + L_{21m} w_m) &= 0, \\ \sum_{m=0}^M (L_{21m} u_m + L_{22m} w_m) &= p. \end{aligned} \tag{14}$$

Розв'язання системи (5) при заданих  $M = 1, 2, \dots, \infty$ , дає значення коефіцієнтів  $u_m$  та  $w_m$ . Підстановка останніх до (14) дає значення функцій переміщень  $u_m$  та  $w_m$  точки  $K(\theta)$  (рис. 2).

Збіжність рішень (рис. 3) аналізувалась на числових прикладах для прогинів  $w_m$  при утриманні по  $m$  кінцевого числа членів ряду  $M = 1, 2, \dots, 10$  для ізотропної металевої тороїдальної оболонки з наступними значеннями параметрів:  $\mu = 0,25$ ,  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $a = 1$  м,  $p = 1 \cdot 10^5$  Па,  $k = 0,25$ .

Для підтвердження адекватності запропонованого методу його було опробовано на рішеннях [12] для функції прогинів.

Авторами [12] запропоновано методу розрахунку ізотропної тороїдальної оболонки постійної товщини. В роботі рішення (рис. 4) було доведено до числових результатів. Аналітичне рішення в роботі не наведено.

Числові результати опубліковані в [12] та отримані в даній роботі дають близькі значення, що свідчить про адекватність запропонованої моделі для визначення компонентів напружено-деформованого стану. Автори [12] не надали інформації відносно збіжності їх рішень, або скільки членів ряду вони утримували при розрахунках.

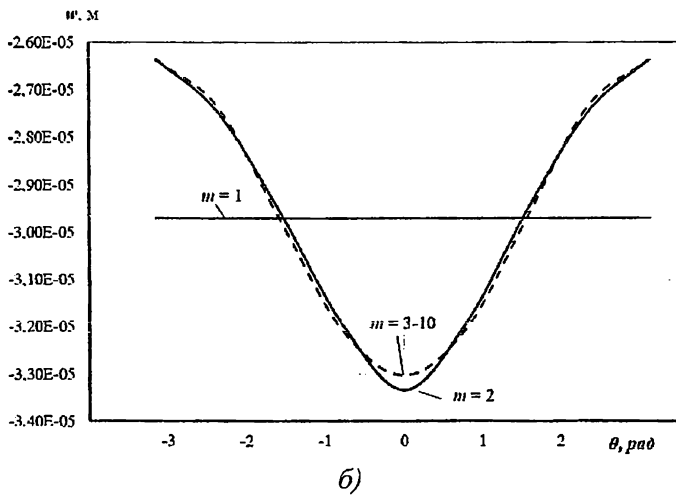
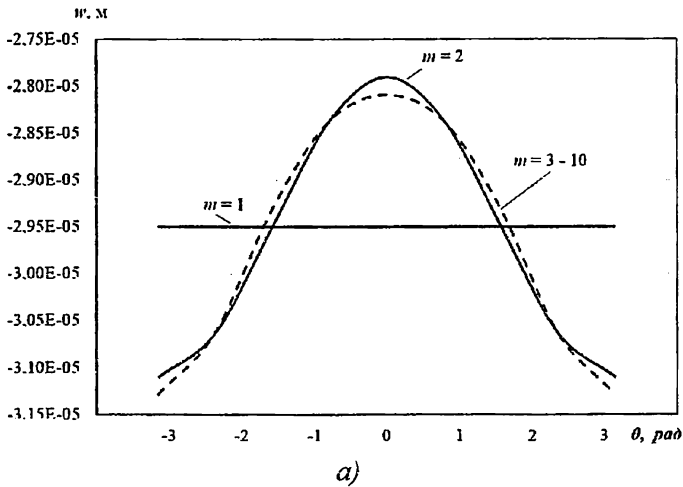


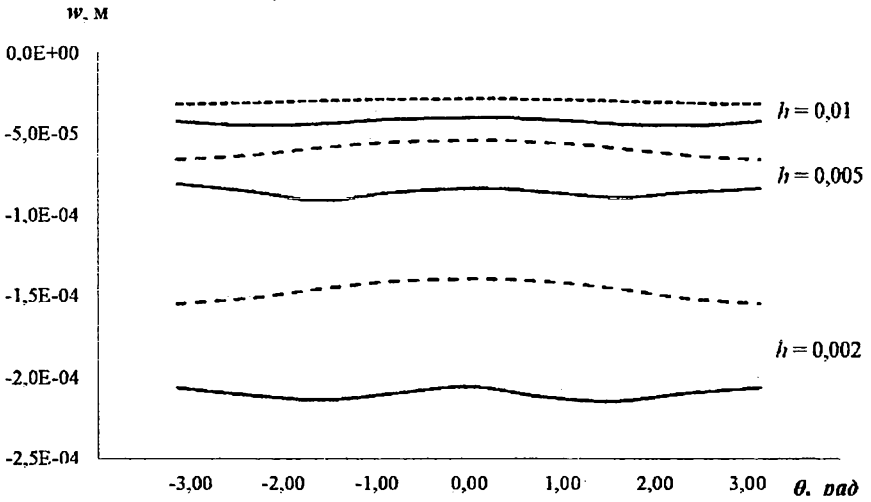
Рис. 3. Збіжності рішень для прогинів ізотропної торіодальної оболонки при гідростатичному стисканні:

а) постійної товщини ( $h(\theta) = 2h_1 = \text{const} = 0,01 \text{ м}$ );

б) змінної товщини ( $h_2(\theta) = h_1 \frac{1+k}{1+k \cos \theta}$ )

Проте, виготовити міцний корпус в формі тора постійної товщини досить складно. Для ізотропної (металевої) оболонки за рахунок технології виготовлення, наприклад штампування, гнуття листів, теж отримується торіодальна оболонка змінної товщини.

Із аналізу збіжностей отриманих у даній роботі рішень для прогинів  $w(\theta)$  ізотропної тороїдальної оболонки постійної товщини достатньо утримувати  $M=3$  члени ряду, для оболонки змінної товщини з параметрами (1) теж достатньо утримувати до  $M=3-4$  члени ряду. Із аналізу розподілу прогинів по меридіану тороїдальної оболонки можна зазначити, що у випадку постійної товщини (див. рис. 3, а) максимальний прогин буде при  $\theta = \pm\pi/2$ , а при змінній товщині спостерігається переміщення максимального прогину у точку  $\theta = 0$ , що обгрунтовано.



— рішення [12], --- запропоноване рішення

Рис. 4. Епюри розподілу прогинів по меридіану (координата  $-\pi \leq \theta \leq \pi$ ) при  $a = 1$  м;  $k = 0,25$ ;  $h = 0,01$  м;  $p = 1 \cdot 10^5$  Па

На основі отриманих даних можна зробити припущення, що для ортотропної тороїдальної оболонки, для надійності збіжності результатів щодо обчислення погонних зусиль  $N_1$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  та моменту  $M_1$  потрібно буде утримувати більшу кількість членів ряду, що пов'язано з процедурою диференціювання згідно з (3) та (4). Отримані результати дають можливість вирішувати проблему оптимізації конструкції тороїдального міцного корпусу в залежності від глибини занурення, коефіцієнта форми тороїда  $k = a/R$ , відносних товщин, схеми намотування та кутів намотування.

## Висновки

1. Розроблено метод визначення напружено-деформованого стану композиційних тороїдальних міцних корпусів підводних технічних

засобів з урахуванням змінної товщини при поперечному намотуванні в комбінації з повздовжньою намоткою (або викладкою).

2. Отримано епюри розподілу прогинів по меридіанному пере-різу тору для оболонок змінної товщини та виявлено їх особливості.

3. Проведено аналіз збіжності прогинів для міцних корпусів із ізотропного матеріалу, який показав, що для тороїдальної оболонки постійної товщини потрібно утримувати  $M=3$  члени ряду, а для торої-дальної оболонки змінної товщини –  $M=3-4$ .

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zimmerman S. *Submarine Technology for the 21 st Century* / S. Zimmerman // Trafford Publishing. – 2000. – 230 p.
2. Пат. UA 78215 U, МПК B63G 8/00. Підводне судно типу «Пірнаюче блюдце» підвищеної маневреності / С.Т. Бурдун, А.В. Крептюк: Заявл. 18.09.2012; Опубл. 11.03.2013. – Бюл. № 5.
3. Пат. 04043190А Японії, МКИ B63G 8/00. Large-sized submersible vessel / Bada Eiichi (Mitsubishi Heavy Ind LTD). – № 02150689. – Опубл. 13.02.1992.
4. Пат. 2026951 Великобританії, МКИ B63B 3/13. Underwater hulls or tanks / Santi; Giunio G. (Italy, IT) - №7915212 – Опубл. 13.02.1980.
5. Крептюк А.В. Проектирование и метод расчета устойчивости композитных тороидальных прочных корпусов подводных технических средств, полученных продольно-поперечной намоткой / А.В. Крептюк // Проблемы техники: Научно-производственный журнал. – 2011. – № 2. – С. 113-127.
6. Комков М.А., Буланов И.М. Определение конструктивно-технологических параметров оболочек, намотанных из композиционных материалов: Учебное пособие / М.А. Комков, И.М. Буланов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992. – 83 с.
7. Амбарцумян, С.А. Общая теория анизотропных оболочек / С.А. Амбарцумян. – М.: Изд-во НАУКА, 1974. – 448 с.
8. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – Изд. 2-е, перераб. и доп / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
9. Бурдун Е.Т., Крептюк А.В. Упругие характеристики намоточной тороидальной оболочки / Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк // Методы решения прикладных задач механики деформированного твердого тела: Сб. научн. работ Днепропетровского национального университета им. О. Гончара. – 2010. – № 11.

10. Вольмир А.С., Хайрнатов К.З. Устойчивость тороидальных композитных оболочек / А.С. Вольмир, К.З. Хайрнатов // *Механика композитных материалов*. – 1982. – № 3. – С.454-459.
11. Шутенко Л.Н., Засядько Н.А., Чупрынин А.А. Основы теории упругости и пластичности / Л.Н. Шутенко, Н.А. Засядько, А.А. Чупрынин // *Учебн. пособие для студентов строительных специальностей*. – Харьков: ХНАГХ, 2007. – 135 с.
12. Гребенюк С.Н. Напряженно-деформированное состояние тороидальных оболочек / С.Н. Гребенюк, Ю.А. Сысоев, Н.Ю. Сысоев // *Вестник Запорожского национального университета*. – 2010. – № 2 – С 24-28.

*Стаття надійшла до редакції 15.11.2017*

Рецензенти – доктор технічних наук, професор кафедри Конструкцій та механіки судна Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова Л.І. **Коростильов**



УДК 556.532:502.7

А.П. Блажко

### ЕКОЛОГО-ІРИГАЦІЙНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД В БАСЕЙНІ РІЧКИ АЛКАЛІЯ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ

*У статті виконано еколого-іригаційне оцінювання якості поверхневих вод в басейні р. Алкалія за 2006-2016 рр. Дослідженням встановлено, що у зв'язку з високим ступенем забрудненості поверхневі води обмежено придатні та непридатні для ведення екологічно-безпечного рибогосподарського, житлово-комунального водокористування та зрошувального землеробства. Присутність у поверхневих водах високих концентрацій біогенних елементів та органічних речовин пов'язана зі скидами промислових та комунально-побутових стічних вод, стоком сільськогосподарських угідь та скидними водами із зрошувальних полів на яких застосовують мінеральні добрива.*

**Ключові слова:** поверхневі води річкового басейну, екологічна оцінка якості води.

*В статье выполнено эколого-ирригационное оценивание качества поверхностных вод в бассейне р. Алкалия за 2006-2016 гг. Исследованиями установлено, что в связи с высоким уровнем загрязненности поверхностные воды ограничено пригодные и непригодные для ведения эколого-безопасного рыбохозяйственного, жилищно-коммунального водопользования и орошаемого земледелия. Наличие в поверхностных водах повышенных концентраций биогенных элементов и органических веществ обусловлено сбросами промышленных и коммунально-бытовых сточных вод, стоком с сельскохозяйственных угодий и сбросными водами с орошаемых полей, на которых применяются минеральные удобрения.*

**Ключевые слова:** поверхностные воды речного бассейна, экологическая оценка качества воды.

*In the article has been performed an ecological-irrigation estimation of the compliance of the quality indicators of surface waters of the Alkali River with the normative requirements of the maximum permissible concentrations; appropriate calculations and ecological assessment of surface water quality according to the relevant categories; Irrigation estimation of river water quality according to agronomic criteria. It has been established by research that due to the high degree of foulness by the components of saline composition, trophic-saprobiotic (ecological and sanitary) and specific toxic substances, surface water is limited and impotable for ecologically safe fishing, housing and communal water use, and irrigation agriculture.*

© Блажко А.П., 2017

*Quantitative average annual and worst hydro chemical indicators, estimated block and integral water quality index, the degree of its trophy, and the area of saprobity zone allows in general to estimate the waters of the Alkali River at the level from III to IV classes, 4 and 6 categories of quality, which characterizes water from «satisfactory» to «bad» – in quality; from «moderately polluted» to «dirty» – the degree of purity. According to the trophic status of the examined water «eutolithropic», the area of saprophytic – «a'-mesosaprobic» waters. The presence in the surface waters of high concentrations of biogenic elements and organic substances is associated with discharges of industrial and municipal sewage disposal, runoff from agricultural land and waste water from irrigated fields on which mineral fertilizers are used.*

*The ecologically-irrigational estimation of surface water quality in the water collecting area of Alkali River can be used to determine the main areas of nature conservation activity in relation to the improvement of the investigated water object or its separate area, the establishment of the effectiveness of water protection measures and ecological water quality standards.*

***Keywords:** surface water of the river basin, ecological estimation of water quality.*

**Вступ.** На теперішній час особливою проблемою для «малих» річок є значне погіршення якості води внаслідок посилення впливу господарської діяльності (високий рівень розораності схилів, скиди в річки недостатньо очищених стічних вод, побутового сміття, зарегульованість поверхневого стоку, незадовільне господарювання при використанні природних ресурсів на водозаборах, масове порушення природоохоронного режиму). За таких умов особливої актуальності набувають раціональне використання й охорона природних ресурсів, у тому числі водних [1].

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Провівши огляд наукових публікацій за темою дослідження з'ясовано, що гідроекологічна вивченість поверхневих вод в басейні р. Алкалія є недостатньою. Питання щодо екологічного стану басейну досліджуваного водного об'єкта вивчалися лише вченими кафедри гідроекології та водних досліджень Одеського державного екологічного університету (М.Є. Даус, Я.С. Яров). Результати досліджень, які опубліковано в фахових виданнях [2-4], вказують на погіршення гідроекологічної ситуації в басейні р. Алкалія. Тому виникає необхідність подальшого дослідження гідрохімічного стану поверхневих вод зазначеного водного об'єкта, що й обумовлює актуальність теми дослідження.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою дослідження є проведення еколого-іригаційного оцінювання якості поверхневих вод в басейні річки Алкалія. Для досягнення мети роботи реалізовано наступні завдання:

1) виконано оцінювання відповідності показників якості поверхневих вод р. Алкалія нормативним вимогам граничнодопустимих концентрацій (ГДК);

2) виконано екологічне оцінювання якості поверхневих вод за відповідними категоріями;

3) проведено іригаційне оцінювання якості річкової води за агрономічними критеріями.

**Матеріали досліджень.** Об'єктом дослідження служать поверхневі води в басейні р. Алкалія, яка бере початок зі ставка на території Молдови неподалік від молдовсько-українського кордону. Тече переважно на південь по території Татарбунарського та Білгород-Дністровського районів Одеської області, впадає в озеро Солоне поблизу південно-західної частини села Базар'янка [5]. Довжина ріки – 69 км, площа водозбору – 653 км<sup>2</sup>, залісеність – 5,3 %, заболоченість – 0 %, розпаханість – 68,9 %. Норма річкового стоку складає 6,817 млн. м<sup>3</sup>, стік маловодних років забезпеченністю 75 % становить 1,976 млн. м<sup>3</sup>, середньорічна витрата – 0,215 м<sup>3</sup>/с. Живлення річки в основному снігове, під час весняної повені проходить близько 80 % річкового стоку. Досліджуваний водний об'єкт має широке побутове і рибогосподарське використання, потребує ретельного вивчення і постійного та організованого моніторингу. Тому тему даної роботи можна вважати актуальною. В басейні р. Алкалія побудовано Карналіївську (636 га) та Крутоярівську (306 га) зрошувальні системи, джерелом зрошення є Монашанське (повний об'єм 1,883 млн. м<sup>3</sup>) та Староцаричанське (повний об'єм 0,918 млн. м<sup>3</sup>) водосховища.

Досліджувана територія характеризується посушливим кліматом. Опади (400-450 мм/рік) носять здебільшого зливовий характер, що обумовлює бурний стік поверхневих вод та сприяє розвитку ерозійних форм рел'єфа і площинної ерозії. Серед ґрунтів вододілів переважають чорноземи звичайні малогумусні. Природна степова рослинність на вододілі замінена культурною. Ґрунтові води знаходяться глибоко, що й обумовлює низький річковий стік.

В роботі використані результати гідрохімічних досліджень поверхневих вод в басейні р. Алкалія на контрольному гідрохімічному посту біля с. Широке (7 км від гирла) Білгород-Дністровського району Одеської області за період 2006-2016 рр., джерело вихідної інформації [6; 7]. Проби води відбирались щоквартально згідно до вимог постанови Кабінету Міністрів України від 20.07.1998 р. № 815 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод» [8]. Лабораторією гідроекологічного моніторингу Одеської гідрогеолого-меліоративної експедиції (ОГТМЕ) Одеського обласного управління водних ресурсів визначалися такі гідрохімічні показники: рівень рН, лужність, твердість, вміст гідрокарбонатів, сульфатів, хлоридів, кальцію, магнію, натрію, калію, мінералізація, завислі речовини, іони амонію, вміст нітратів, нітритів,

фосфатів, БСК<sub>5</sub>, концентрація загального заліза, СПАР, нафтопродукти, концентрація специфічних речовин токсичної дії та ін.

**Результати досліджень.** Для оцінювання відповідності показників якості води р. Алкалія нормативним вимогам в роботі використані нормативи якості води для водойм господарсько-побутової, рибогосподарської та питної категорії водокористування [9-11]. Аналіз осереднених середньорічних та максимальних (найгірших) гідрохімічних показників моніторингових спостережень за 2006-2016 рр. показав, що відхилення від норми (кратність перевищення ГДК) є за такими показниками (табл.):

*Таблиця*

*Результати аналізу придатності води р. Алкалія для різних видів водокористування за середньоарифметичними значеннями 2006-2016 рр.*

Показники якості річкової води	Вміст інгредієнтів у воді		Кратність перевищення ГДК* гп		Кратність перевищення ГДК* ** рг		Кратність перевищення ГДК*** пв	
	<i>C<sub>сер.</sub></i>	<i>C<sub>макс.</sub></i>	сер.	макс.	сер.	макс.	сер.	макс.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	3005	4095	3,0	4,1	3,0	4,1	3,0	4,1
Сульфатні іони, мг/дм <sup>3</sup>	1193	2103	2,4	4,2	11,9	21,0	3,4	6,0
Хлоридні іони, мг/дм <sup>3</sup>	631	784	1,8	2,2	2,1	2,6	2,5	3,1
Іони магнію, мг/ дм <sup>3</sup>	167	192	3,3	3,8	4,2	4,8	2,1	2,4
Іони натрію, мг/дм <sup>3</sup>	501	815	2,5	4,1	4,2	6,8	2,5	4,1
БСК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	9,3	26,7	3,1	8,9	3,1	8,9	2,3	6,7
ХСК, мг О/ дм <sup>3</sup>	102,3	195,1	6,8	13,0	2,0	3,9	20,5	39,0

*Примітки до таблиці:*

*ГДК\* гп, ГДК\*\* рг, ГДК\*\*\* пв – гранично допустима концентрація для водойм господарсько-побутового, рибогосподарського та питного водокористування*

Аналіз табличного матеріалу свідчить про те, що у зв'язку з високим рівнем перевищення ГДК за показниками мінералізації, сульфат-іонів, іонів хлору, магнію, натрію, БСК<sub>5</sub>, ХСК поверхневі води непри-

датні для господарсько-побутового, рибогосподарського та питного водокористування без попереднього покращення їхнього стану.

**Екологічне оцінювання якості поверхневих вод за відповідними категоріями.** Екологічне оцінювання якості поверхневих вод за відповідними категоріями передбачає обов'язкове включення трьох блоків показників: блок сольового складу, блок трофо-сапробіологічних (еколого-санітарних) показників та блок специфічних речовин токсичної дії. Процедура виконання екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями складається з чотирьох послідовних етапів [12; 13].

На першому етапі вихідні дані з якості води за окремими її показниками групуються у межах кожного з трьох блоків, обчислюються середньорічні (середні), а також визначаються максимальні (найгірші) значення одних і тих самих показників якості води. Другий етап – визначення класів і категорій якості води, полягає у зіставленні середніх значень з критеріями класифікацій. Таке зіставлення виконується у межах трьох блоків. На третьому етапі виконання екологічного оцінювання якості поверхневих вод проводиться групування показників трьох блоків за визначеними категоріями якості води. На завершальному (четвертому) етапі виконуються розрахунки блокових індексів якості вод та визначається вербальна характеристика якості вод за величинами блокових показників. Блокові індекси обчислюються для середніх ( $I_{1сер.}, I_{2сер.}, I_{3сер.}$ ) і максимальних значень ( $I_{1макс.}, I_{2макс.}, I_{3макс.}$ ) з визначенням класу і категорій якості води. Для однозначної оцінки екологічного стану поверхневих вод розраховується інтегральний (екологічний) індекс якості води для середніх і максимальних (найгірших) значень категорій якості води окремо ( $I_{Есер.}; I_{Емакс.}$ ) за формулами (1), (2)

$$I_{Есер.} = \frac{I_{1сер.} + I_{2сер.} + I_{3сер.}}{3}, \quad (1)$$

$$I_{Емакс.} = \frac{I_{1макс.} + I_{2макс.} + I_{3макс.}}{3}, \quad (2)$$

де  $I_{1сер.}, I_{1макс.}$  – індекси забруднення компонентами сольового складу за осередненими та максимальними значеннями показників;

$I_{2сер.}, I_{2макс.}$  – індекси трофо-сапробіологічних (еколого-санітарних) показників за осередненими та максимальними значеннями;

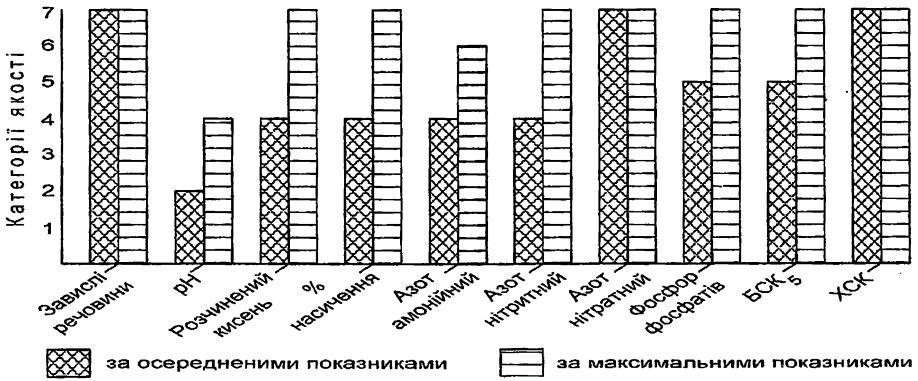
$I_{3сер.}, I_{3макс.}$  – індекси специфічних показників токсичної дії за середньорічними та максимальними значеннями інгредієнтів.

Для виконання оцінки екологічного стану поверхневих вод в басейні р. Алкалія за наведеною методикою використано осередненні значення середньорічних і максимальних значення гідрохімічних показників за 2006-2016 рр.

Розрахунки показали, що за критерієм мінералізації як за середніми, так і за максимальними значеннями, вода належала до класу якості «солонуваті води-II», категорії якості – « $\beta$  – мезогалинні-3». Мінералізація річкової води в досліджуваному періоді за осередненими значеннями гідрохімічних показників змінювалася у межах 2,6-4,1 г/дм<sup>3</sup>, а за максимальними значеннями – 3,1-7,2 г/дм<sup>3</sup>. За критеріями іонного складу вода відповідала сульфатно-хлоридному класу, групи кальцію (в 2006, 2011, 2016 рр. – групи магнію), другого типу (в 2011 та 2016 рр. – третього типу). За величиною рН води характеризувалися як слабо-лужні.

Розрахункові блокові індекси якості поверхневих вод за осередненими значеннями гідрохімічних величин склали:  $I_{1сер.} = 5,00$ ,  $I_{2сер.} = 5,67$ ,  $I_{3сер.} = 4,67$ , а інтегральний (екологічний) індекс якості води  $I_{Есер.} = 5,11$ . Згідно до [13] поверхнєві води відповідали III класу якості, категорія 5, субкатегорія 5 і оцінювались як «посередні», «помірно забруднені» води з ухилом до категорії «задовільних», «слабко забруднених», за трофністю – «евполітрофні», зона сапробності – « $a'$  – мезосапробні» води. Відповідні блокові індекси якості води за максимальними (найгіршими) показниками хімічних інгредієнтів склали:  $I_{1макс.} = 6,00$ ,  $I_{2макс.} = 6,89$ ,  $I_{3макс.} = 5,33$ , а інтегральний індекс якості  $I_{Емакс.} = 6,07$ . Такі води відповідають IV класу, категорія 6, субкатегорія 6 і оцінюються за якістю – «погані» води, за ступенем чистоти – «брудні», за трофністю – «політрофні», зона сапробності – « $a$ »-мезосапробні» води.

Дослідженнями встановлено, що найбільш несприятливими кількісними характеристиками представлено більшість показників трофо-сапробіологічного блоку. Так, наприклад, за осередненими значеннями вміст завислих речовин складав 129,1 мг/дм<sup>3</sup> (7 категорія якості), азоту нітратного – 6,73 мг/дм<sup>3</sup> (7 категорія), фосфору фосфатів – 0,20 мг/дм<sup>3</sup> (5 категорія), показник БСК<sub>5</sub> – 9,3 мг О<sub>2</sub>/ дм<sup>3</sup> (5 категорія), показник ХСК – 102,3 мг О/ дм<sup>3</sup> (7 категорія). За найгіршими значеннями вміст завислих речовин складав 225,4 мг/дм<sup>3</sup> (7 категорія якості), розчинений кисень – 2,57 мг О<sub>2</sub>/ дм<sup>3</sup> (7 категорія), азоту амонійного – 1,01 мг/дм<sup>3</sup> (6 категорія), азоту нітритного – 0,32 мг/дм<sup>3</sup> (7 категорія), азоту нітратного – 16,2 мг/дм<sup>3</sup> (7 категорія), фосфора фосфатів – 0,40 мг/дм<sup>3</sup> (7 категорія), показник БСК<sub>5</sub> – 25,1 мг О<sub>2</sub>/ дм<sup>3</sup> (7 категорія), ХСК – 139,9 мг О/ дм<sup>3</sup> (7 категорія). Демонстрація результатів оцінки якості води р. Алкалія за трофо-сапробіологічними критеріями представлена на рисунку.



*Рис. Категорії якості води р. Алкалія  
за показниками трофо-сапробіологічного блоку за період 2006-2016 рр.*

Щодо блоку специфічних речовин токсичної дії, в роботі відслідковувалась наявність лише 3 показників, а саме: заліза загального, нафтопродуктів та СПАР. Найбільш значне погіршення якості води р. Алкалія відбувалось за рахунок високих концентрацій СПАР. За середньорічними значеннями зазначений показник змінювався від 170 до 420 мкг/дм<sup>3</sup> (6-7 категорії якості), а за максимальними – від 270 до 680 мкг/дм<sup>3</sup> (7 категорія). Залізо загальне та нафтопродукти справляли дещо менший вплив на погіршення якості річкової води. Так за середньорічними значеннями вміст заліза у воді змінювався у межах 0-210 мкг/дм<sup>3</sup> (1-2 категорії якості), а за максимальними значеннями – 100-510 мкг/дм<sup>3</sup> (3-4 категорії). Вміст нафтопродуктів варіював в основному у межах 20-80 мкг/дм<sup>3</sup> (2-4 категорія якості води), максимальне значення зафіксовано 24.05.2013 р. – 1100 мкг/дм<sup>3</sup>.

**Оцінювання якості води р. Алкалія за агрономічними критеріями.** Агрономічні критерії придатності води встановлює ДСТУ 2730: 2015 «Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії» [14], згідно до якого нормування якості зрошувальної води здійснюють на основі показників загальних концентрацій токсичних іонів (в еквівалентах хлору). Під час оцінювання якості зрошувальної води виділяють три класи її придатності: I клас – придатна, II клас – обмежено придатна, III – непридатна. Зрошувальна вода I класу – придатна для зрошення без обмежень. Зрошувальну воду II класу використовують за умови обов'язкового застосування комплексу заходів запобігання деградації ґрунтів або поліпшення води до показників I класу. Зрошувальна вода III класу – вода, показники якої виходять за межі значень, що встановлені для зрошувальних вод II класу, непридатна для зрошення без попереднього поліпшення її складу. Якість зрошувальної води оцінюють, урахуовуючи: небезпеку іригаційного засолення, підлуження, осолонцювання ґрунту та токсичний вплив зрошувальної води на рослини [14].

**Оцінювання якості поверхневих вод за безпекою іригаційного засолення ґрунту.** Оцінювання якості поверхневих вод здійснюють на основі показника токсичних іонів, відображених в еквівалентах хлорид-іонів ( $eCl^-$ ), *мекв/дм<sup>3</sup>* за формулою (3)

$$eCl^{-\text{токс.}} = Cl^- + 0,2SO_4^{2-\text{токс.}} + 0,4HCO_3^{-\text{токс.}} + 10CO_3^{2-\text{токс.}}, \quad (3)$$

де  $eCl^{-\text{токс.}}$  – сума токсичних солей в еквівалентах хлору, *мекв/дм<sup>3</sup>*;

$Cl^-$  – сума хлоридів, *мекв/дм<sup>3</sup>*;

$SO_4^{2-\text{токс.}}$  – сума токсичних сульфатів, *мекв/дм<sup>3</sup>*;

$HCO_3^{-\text{токс.}}$  – сума токсичних гідрокарбонатів, *мекв/дм<sup>3</sup>*;

$CO_3^{2-\text{токс.}}$  – сума токсичних карбонатів, *мекв/дм<sup>3</sup>*.

Результати оцінювання якості поверхневих вод р. Алкалія за безпекою іригаційного засолення ґрунтів свідчать про наступне. Концентрація токсичних іонів у річковій воді за середньорічними значеннями гідрохімічних показників змінювалася від 18,2 до 36,6 *мекв/дм<sup>3</sup>*, що відповідає II та III класу якості води. Згідно до [14] поверхневі води за безпекою іригаційного засолення ґрунтів обмежено придатні та непридатні для зрошення з ризиком вторинного засолення та деградації ґрунтів.

**Оцінювання якості поверхневих вод за безпекою підлуження ґрунту.** Оцінювання виконано на основі комплексного оцінювання водневого показника ( $pH$ ), токсичної лужності ( $HCO_3^- - Ca^{2+}$ ), *мекв/дм<sup>3</sup>* та лужності від нормальних карбонатів ( $CO_3^{2-}$ ), *мекв/дм<sup>3</sup>*. Причому клас якості води визначають за двома гіршими з трьох кількісних показників [14].

Впродовж усього періоду досліджень значення  $pH$  у поверхневих водах варіювали від 7,0 до 8,3 одиниць (поріг для II класу – 8,5 од.). Лужність від нормальних карбонатів ( $CO_3^{2-}$ ) у воді змінювалася в межах 0,03-0,30 *мекв/дм<sup>3</sup>* (поріг для II класу – 0,3 *мекв/дм<sup>3</sup>*). Таким чином, провівши аналіз та комплексне оцінювання показників якості води, можливо стверджувати, що поверхневі води р. Алкалія за безпекою підлуження ґрунту відповідають II класу якості (обмежено придатні для зрошення).

**Оцінювання якості поверхневих вод за безпекою осолонцювання ґрунту.** Якість поверхневих вод оцінювалась за величиною співвідношення (у відсотках) суми лужних катіонів натрію й калію (*мекв/дм<sup>3</sup>*) до суми всіх катіонів (*мекв/дм<sup>3</sup>*) з урахуванням основних типів зрошуваних ґрунтів, їх протисолонцювальної буферності та гранулометричного складу ґрунтів, величини перевищення в зрошувальній воді магнію над кальцієм і класу води за безпекою підлуження ґрунтів [14].



За результатами оцінювання величина співвідношення (у відсотках) суми лужних катіонів натрію й калію до суми всіх катіонів (*мекв/дм<sup>3</sup>*) змінювалася від 38 до 45 відсотка, що відповідає I класу якості води за небезпекою осолонцювання ґрунтів. Виняток складають 2006 та 2008 рр. коли величина вищезазначеного співвідношення сягала 51,0 і 47,3 % відповідно (верхній поріг I класу якості – 45 %), тобто така вода обмежено придатна для зрошення без попереднього покращення її складу.

**Оцінювання якості поверхневих вод за небезпекою токсичного впливу на рослини.** Згідно до [14] оцінювання виконувалось комплексно за водневим показником *pH*, вмістом лужності від нормальних карбонатів ( $CO_3^{2-}$ ), вмістом аніона хлору ( $Cl^-$ ) та концентрації токсичних солей. Дослідження показали, що значення водневого показника *pH* у поверхневих водах змінювалися від 7,0 до 8,3 одиниць (верхній поріг для II класу – 8,5), концентрація хлор-іонів змінювалася в межах 15,0-22,4 *мекв/дм<sup>3</sup>*, а вміст токсичних іонів (в еквівалентах хлору) варіював від 18,2 до 36,6 *мекв/дм<sup>3</sup>*. За результатами оцінювання можливо зробити висновки, що поверхневі води р. Алкалія за небезпекою токсичного впливу на рослини в основному обмежено придатні для зрошення (II клас якості).

**Висновки.** Дослідження показало, що стан поверхневих вод р. Алкалія за екологічною якістю знаходяться у межах від III до IV класу якості, оцінюються від «задовільних» до «брудних» за якістю, а за ступенем чистоти – від «помірно забруднених» до «брудних», за трофічним статусом – «евполітрофні», зона сапробності – «a' – мезосапробні» води.

У зв'язку з високим ступенем забрудненості солями сульфатів, хлоридів, натрію, біогенними та специфічними речовинами токсичної дії (азот нітритний, нітратний та фосфор фосфатів, СПАР) поверхневі води обмежено придатні та непридатні для ведення екологічно-безпечного водокористування у житлово-комунальному, рибогосподарському господарстві та зрошувальному землеробстві.

Екологічний стан поверхневих вод в басейні р. Алкалія можливо поліпшити шляхом реконструкції існуючих та будівництва нових очисних споруд, припинення скидів неочищених стоків, приведення у належний стан прибережних захисних смуг, розчищення та берегоукріплення річкової мережі.

Незадовільний екологічний стан поверхневих вод басейну р. Алкалія обумовлює необхідність посилення уваги з боку природоохоронних органів Одеської області щодо нормалізації якості водних ресурсів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчий В.І. Процеси формування хімічного складу поверхневих вод [Текст]: Монографія / В.І. Осадчий, Б.Й. Набиванець, П.М. Линник та ін. – К.: Ніка-Центр, 2013. – 240 с.
2. Яров Я.С. Оцінка якості води річок південної частини Одеської області у 2008 році / Я.С. Яров [Електронний ресурс]: Режим доступу: [www.rusnauka.com/19\\_AND\\_2013/.../6\\_142438.doc.htm](http://www.rusnauka.com/19_AND_2013/.../6_142438.doc.htm).
3. Лужанська Д.В. Оцінка екологічного стану і придатності для риборозведення деяких малих річок Південно-Західного Причорномор'я [Текст] Д.В. Лужанська / 36. статей за матеріалами студентської наук. конфер. ОДЕКУ. – 6-10 квітня 2015. – Одеса, 2015. – С 87-92.
4. Даус М.Е. Оценка экологического состояния некоторых малых рек Северо-Западного Причерноморья / М.Е. Даус // Сб. трудов Северо-Кавказкого ин-та. – Вып. 21. – Пятигорск. – 2015. – С. 33-40. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://istina.msu.ru/collections/8919584>
5. Водні ресурси Білгород-Дністровського району. Білгород-Дністровське управління водного господарства. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://tiraag.jimdo.com>
6. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2016 році. [Електронний ресурс]: Режим доступу: [//dostup.pravda.com.ua/request/13964/response/22466/attach/5/attachment.pdf](http://dostup.pravda.com.ua/request/13964/response/22466/attach/5/attachment.pdf).
7. Фондові матеріали Департаменту екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації [Текст]: / Результати гідрохімічних досліджень стану поверхневих вод в водних об'єктах Одеської області в 2006-2016 рр. – 16 с.
8. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод [Текст]: Постанова Кабінету Міністрів України від 20.07.1998 р. № 815 // 36. урядових актів України. – 1998. – 19 с.
9. Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения [Текст]: СанПиН №4630-88. – М.: Минздрав СССР. – 1988. – 69 с.
10. Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно безопасных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. [Електронний ресурс]. – М., 1995. – Режим доступу: <http://refdb.ru/look/3488628.html>.

11. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10). [Електронний ресурс]. – ТОВ «ЛІГА ЗАКОН», 2007-2010. – Режим доступу: <http://bib.convdocs.org/v3911>
12. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В.Д. Романенко, В.М. Жукинський, О.П. Оксіюк, А.В. Яцик та ін. – К.: Символ-Т, 1999. – 28 с.
13. Досвід використання «Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями» [Текст] / А.В. Яцик, В.М. Жукинський, А.П. Чернявська, І.С. Єзловецька. – К.: Оріяни, 2006. – 44 с.
14. Якість природної води для зрошення. Агронімічні критерії [Текст] / ДСТУ 2730:2015. – К.: ДП УкрНДНЦ, 2016. – 9 с.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2017

#### **Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри Гідротехнічного будівництва Одеської державної академії будівництва та архітектури **С.І. Рогацько**

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Гідротехнічного будівництва Одеської державної академії будівництва та архітектури **В.С. Осадчий**

УДК 656.022.826

С.П. Онищенко, О.Л. Дрожжин

### КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ ФІДЕРНОЇ КОНТЕЙНЕРНОЇ СУДНОПЛАВНОЇ ЛІНІЇ

*У статті запропонована модель, яка має на меті структуровано подати характеристики вантажів, що утворюють контейнеропотоки в фідерних морських регіонах, і знаходяться віддалено від трансокеанських логістичних центрів, до яких належать всі українські чорноморські порти. Суднозаходи океанських суден-контейнеровозів великої вантажомісткості в такі регіональні порти унеможливлені глибинами біля причалів, чи такими експлуатаційними витратами, які роблять їх недоцільними економічно. В статті розглянутий варіант, коли фідерна судноплавна контейнерна лінія організована незалежним оператором, а відносини з магістральним перевізником оформлені слот-чартерною угодою.*

**Ключові слова:** вантажопотік, контейнеропотік, морське контейнерне перевезення, лінійне суднопластво, фідерна лінія.

*В статтє предложена модель, которая имеет целью структурировано представить характеристики грузов, образующие контейнеропотоки в фидерных морских регионах, находящихся отдаленно от трансокеанских логистических центров, к которым относятся все украинские черноморские порты. Суднозаходы океанских судов-контейнеровозов большой контейнерной грузоместимости в такие региональные порты невозможны в виду ограниченных глубин у причалов, или с такими эксплуатационными расходами, которые делают их нецелесообразными экономически. В статтє рассмотрен вариант, когда фидерная судоходная контейнерная линия организована независимым оператором, а отношения с магистральным перевозчиком оформлены слот-чартерным соглашением.*

**Ключевые слова:** грузопоток, контейнеропоток, морская контейнерная перевозка, линейное судоходство, фидерная линия.

*The paper is dedicated to using the model that aims to structurally submit the cargoes, which creating container flows in feeder-regions, that are located too far from transocean logistics centers. Such feeder regions included all of Ukrainian Black Sea ports. Ocean container's vessels calls to such regional ports is impossible due to limited berth's depths, or due to operational costs, that making ship calls inexpedient economically. The article considers the option when the feeder container line is organized by an independent feeder operator, and relations with the trunk-line carrier are fixed by the slot-charter agreement.*

**Keywords:** cargo flows, container flows, container shipping, liner shipping, feeder shipping line.

**Вступ.** Більшість вітчизняних і міжнародних вчених а також міжнародні Конвенції відносять Чорне море до категорії «замкнутих», чи до «незамкнутих» внутрішніх» морів [1]. В будь-якому випадку Чорне море є класичним прикладом регіонального моря, яке здійснює комунікацію зі світовими логістичними центрами через магістрально-фідерні маршрути [2; 3; 4].

Аналіз вантажної бази для організації фідерного сполучення є можливим тільки через уточнення статусу організаторів [5]. В цій роботі йдеться про фідерну судноплавну лінію, яка утворена незалежним організатором, обслуговує заявки регіональних вантажовласників і співпрацює з океанськими перевізниками на умовах слот-чартерного контракту.

**Аналіз літератури.** Галузеві спеціалісти аналізували вантажопотоки відносно власних предметів і об'єктів досліджень в межах сфер наукових інтересів: економіко-математичного моделювання, транспортної географії, статистики, економіки підприємств, та інш.

З точки зору транспортних технологій, ціннішими для визначення кількісних характеристик вантажопотоків можна зазначити:

- методи техніко-економічних досліджень й вишукувань;
- методи прогнозування (насамперед статистичні методи).

Питання аналізу у відношенні географії транспортних мереж найшли відображення в [6; 7; 8]. Вперше в світі математичні підходи до аналізу вантажопотоків найшли відображення в [9]. Статистичні методи прогнозування, накладені на аналіз вантажопотоків, добре описані в [10; 11] і спираються на теорію ймовірностей. Той самий принцип, що розглянутий в [12; 13], де автори досліджують вантажопотоки, користуючись методичним підходом, який базується на статистичних методах – кореляційно-регресійному і кластерному аналізі, обмежуючись розглядом лише географії цих потоків.

Всі розглянуті роботи розглядають поняття «вантажопотік» як деяку кількість одного чи декількох вантажів, сумісних для морського перевезення на певному напрямку і за певний проміжок часу. В контексті цієї роботи під вантажопотоками розуміється кількість і напрямок прийнятих для контейнеризації вантажів, тобто тих, що мають змогу перетворюватися на «контейнеропотоки» в прийнятих параметрах організації фідерної лінії.

**Метою статті** є розробка концептуальної моделі, що надає системну уяву про джерела формування контейнеропотоків, які є базою для функціонування фідерних суден-контейнеровозів в морських регіонах, що не належать до світових логістичних центрів.

**Основний матеріал дослідження.** Показники будь-якого вантажопотоку можна умовно поділити на дві категорії: кількісні і якісні.

Кількісна оцінка вантажопотоків  $Q$  складається з частки об'єму зовнішньої торгівлі генеральними вантажами між такими пунктами відправлення і призначення:

- 1) державою, до якої належать фідерні порти, і країною, до якої належить порт-хаб (такі вантажопотоки породжені відповідними зовнішніми контрактами);
- 2) країною, до якої належать фідерні порти, і країнами, вантажопотоки яких не належать фідерному регіону;
- 3) єдиною країною, до якої належать всі (і лише фідерні) порти регіону;
- 4) між країнами, які не відносяться до фідерного морського регіону, але для яких він є транзитним.

Серед кількісних показників важливішими насамперед є об'єм й напрямок (рис. 1). Об'єми вантажопотоків характеризують їх міцність, яка не може бути виражена лише у тонах, а має бути переведена в TEU, бо незначна кількісна оцінка в масовому вираженні для «легких вантажів» може бути достатньо впливовою, оскільки така група вантажів заповнює судна за контейнеромісткістю.

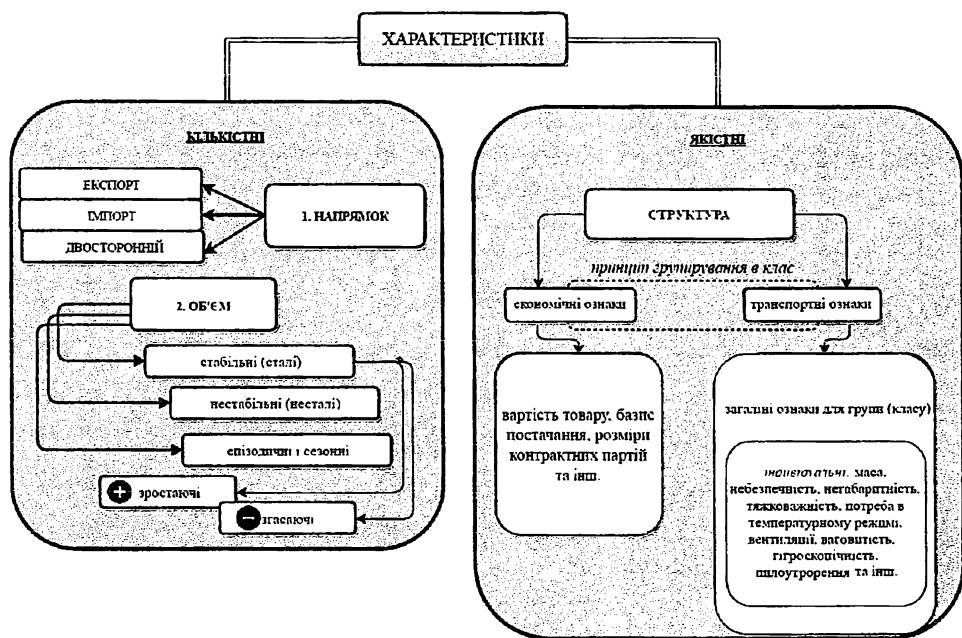


Рис. 1. Класифікація якісних і кількісних елементів контейнеропотоків

При визначенні статистичних даних щодо вантажної бази фідерної лінії важливо виявити тенденції об'єму (зміни міцності): стабільні (сталі), нестабільні (несталі), епізодичні.

Для аналізу напрямку користуються прийомом генералізації за ознаками географічної схожості і номенклатурою вантажів, осередками зародження й згасання. Розрахунки при цьому ведуться за середньо-зваженою відстанню

$$\bar{l} = \frac{l_1 Q_1 + l_2 Q_2 + \dots + l_n Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}, \quad (1)$$

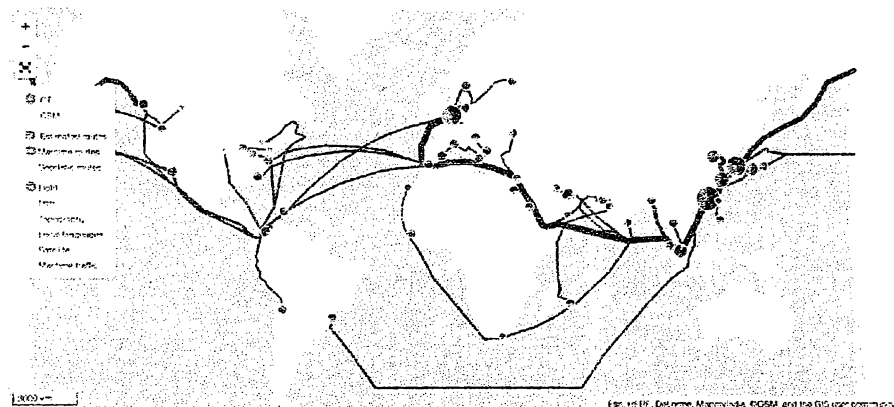
де  $l_1 Q_1 + l_2 Q_2 + \dots + l_n Q_n$  – вантажообіги певних генералізованих вантажопотоків;

$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$  – сумарний об'єм генералізованих вантажопотоків.

Джерелом даних об'ємів контейнеропотоків є програмні продукти, такі як ConTraffic Online Services.

Кількісним вираженням об'єму вантажопотоку є кількість двадцятифутового еквіваленту за певний проміжок часу (TEU), бо традиційне вираження в тонах не дає зрозумілого висновку щодо об'єму «легких» вантажів, частка яких в групі тарно-штучних вантажів є вирішальною.

54 CTIS, with 28 transits:  
586 CSMs



*Рис. 2. Приклад картосхеми генералізованих контейнеропотоків платформи ConTraffic Online Services (ресурс: [14])*

До якісних характеристик вантажопотоків відносять ті, які характеризують структуру генеральних, контейнеропридатних вантажопотоків.

Структура є важливішою якісною характеристикою, яка ілюструє склад окремих чи згрупованих за окремими ознаками вантажів, що складають вантажопотік.

Структурно важливими для контейнеропотоків є ті характеристики, які пов'язані з подорожчанням собівартості перевезення, і мають бути відображені в тарифі надбавками/additionals, тобто є специфічними для конкретного вантажу, чи до групи вантажів (рис. 3; 4).

*Рис. 3. Приклад форми booking note на вантажну групу «плитка, кам'яні вироби» (ресурс:[15])*

BAF	CAF	ISPS	GRI	CS	PSS	WRS	EMSPRC	ICE	IMO	OWS	GS	CCF
Обов'язкові									Сезонні та періодичні			
Специфічні є відповідно вантажу												

*Рис. 4. Структура надбавок до ставки базового фрахту (виділені якісні характеристики за вантажною ознакою, які впливають на вартість перевезення)*

Принцип, за яким групуються окремі товари, обирається оператором самостійно і потребує особливого підходу при класній системі формування класного тарифу – «СВР».

Тобто, структура контейнеропотоку є ознакою групування, груповими і специфічними ознаками групи

$$S = \langle GR, SP \rangle, \quad (2)$$

$$S = \langle GR, \langle IMO, OWS, GS, CCF, \dots, n \rangle \rangle, \quad (3)$$

де  $S$  – структура;

$GR$  – групова ознака, яка власна усім вантажам, генералізованим у спільний потік;

$IMO, OWS, GS, CCF, \dots, n$  – індивідуальні ознаки окремих вантажів: (відповідно: небезпечність, важкість, негабаритність, забрудненість і т. ін.).



Оскільки кожне контейнерне відправлення пов'язано з безліччю різновидів вантажів, кількість індивідуальних ознак не обмежено (хоча на практиці з них зазвичай виділяють лише ті, які ведуть до подорожчення собівартості перевезення – рис. 4).

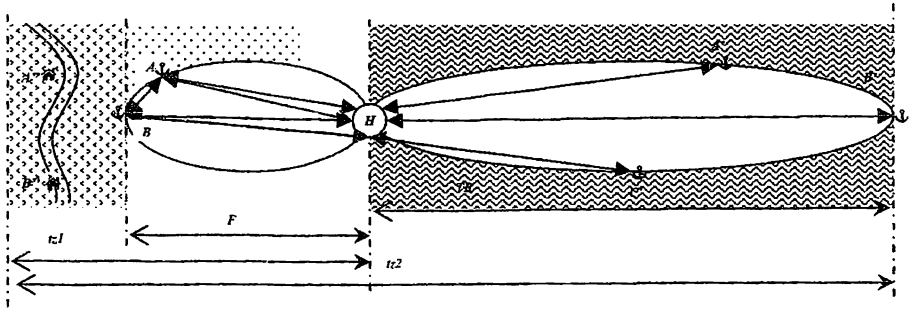


Рис. 5. Географія походження контейнеропотоків, які обробляються на фідерній ділянці складної контейнерної лінії

$A, B$  – власне, фідерні порти регіону, які функціонують на маршрутах певної архітектури і обробляють контейнеропотоки, що тяжіють до них. Усі ці порти заходу пов'язані зі значним логістичним центром – хабом. Ці контейнеропотоки складають базу для замовлень власної клієнтури фідерного перевізника;

$A', B', C'$  – порти, які розташовані на магістральній ділянці ( $TR$ ), за межами фідерного регіону, але ж фідерні порти виступають для них портами відправлення/призначення. Такі порти частіше лежать на океанських шляхах і поєднані з фідерною ділянкою траси хабом.

$A'', B''$  – закордонні пункти (суміжні по підношенню до фідерного регіону) призначення/відправлення, вантажопотоки яких проходять крізь регіон транзитом. Якщо порти призначення/відправлення транзитних вантажів обмежені фідерною ділянкою – їх вантажовласники є потенційною клієнтурою фідерного перевізника ( $Tz1$ ), в протилежному випадку – лише транспортуються суднами фідерної судноплавної компанії до порту-хабу (відрізок  $Tz2$  на рис. 5). В останньому випадку перевезення відбувається за коносаментами, які видані транспортними компаніями-партнерами, що виступають в цьому транспортуванні перевізниками і приймають на себе відповідальність за перевезення протягом всього транспортування «від дверей до дверей».

$H$  – порт трансшипменту (хаб), який розмежовує фідерну й магістральну ділянки траси.

Оскільки вантажною базою для лінійного судноплавства є генеральні вантажі, а перевезення масових (низькотарифікованих) лише забезпечує додатковий прибуток суднохідної компанії внаслідок дисбалансу при репозиції порожняка, слід приймати до аналізу вантажопотоків лише контейнеропридатні вантажопотоки.

$$C = \sum_{i=1}^K Q_i - \sum_{i=1}^K Q_i^N, \quad (4)$$

де  $C$  – вантажопотоки, які приймаються для розгляду в аналізі;  
 $\sum_{i=1}^K Q_i$  – сумарний вантажопотік між парою регіональних портів  
 $i = \overline{1, K}$ ;  
 $\sum_{i=1}^K Q_i^N$  – вантажопотоки, які неприйнятні для контейнеризації чи ті,

які орієнтовані на трампове судноплавство (такі вантажопотоки задіяні в лінійному судноплаванні, але лише на напрямках, де є дисбаланс експорту/імпорту).

Вантажопотоки, які зароджуються чи згасають в межах регіону (відрізок  $F$  на рис. 5), розглядаються як фідерні, і можуть бути за напрямком імпортними ( $HA$ ), експортними, ( $BA$ ) чи каботажними ( $AB$  – зароджуються й згасають між фідерними портами в межах кордонів певної країни фідерного регіону). Вони можуть належати до фідерного регіону

$$C^F = \sum_{j=1}^F Q_j^{im} + \sum_{j=1}^F Q_j^{ex} + \sum_{j=1}^F Q_j^{in}, \quad (5)$$

де  $C^F$  – контейнеропридатні вантажопотоки, що народжуються й згасають у фідерному регіоні  $j = \overline{1, F}$ ;

$\sum_{j=1}^F Q_j^{im}$  – вантажопотоки, що згасають в країні організатора лінії;

$\sum_{j=1}^F Q_j^{ex}$  – вантажопотоки, що народжуються в країні організатора лінії;

$\sum_{j=1}^F Q_j^{in}$  – вантажопотоки, що народжуються й згасають в межах країни

організатора лінії (каботажні).

Вантажопотоки, які утворені парою портів, що належать до фідерного і магістрального регіонів  $k = \overline{1, T}$

$$Q^{TR} = \sum_{k=1}^T Q_k^{im} + \sum_{k=1}^T Q_k^{ex}, \quad (6)$$

$\sum_{k=1}^T Q_k^{im}$  – вантажопотоки, які народжуються на магістральній ділянці і згасають на фідерній;

$\sum_{k=1}^T Q_k^{ex}$  – вантажопотоки, які народжуються на фідерній, та згасають на магістральній ділянці.

Третя група вантажопотоків – транзитна  $C^{tz} = \sum_{n=1}^M Q_n$ . Її утворює множина пунктів зародження і згасання  $n = \overline{1, M}$ , що не належить до фідерного регіону, але тяжіє до нього, проходячи через нього транзитом, тобто

$$C = C^F + C^{TR} + C^{tz}. \quad (7)$$

Таким чином, розроблено концептуальну модель формування вантажної бази фідерної судноплавної лінії на базі ідентифікації та опису її структури та принципів формування.

**Висновки.** Отримані результати є підґрунтям для вирішення експлуатаційних завдань наступних рівнів. Отримані оцінки надають можливість для визначення умов організації нових судноплавних ліній, наприклад, за методикою наближеної кількісної оцінки вантажопотоків, яка наведена в [15]. Визначення групової ознаки є підставою для встановлення певного класу лінійних тарифів, визначення індивідуальних ознак окремих вантажів, які входять до контейнеропотоку, має на меті встановлення компенсаторних надбавок до ставки базисного фрахту, які урівноважать тариф на перевезення з собівартістю транспортування специфічного вантажу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Джунусова Д.Н. *Международное морское право: Учебное пособие.* – Астрахань: Астраханский государственный университет, 2012. – 372 с.
2. Dobler J.P. *Analysis of shipping patterns in the Mediterranean and Black seas // CIESM Workshop Monographs.* – 2002. – Т. 20. – Р. 19-28.
3. Polat O., Günther H.O., Kulak O. *The feeder network design problem: Application to container services in the Black Sea region // Maritime Economics & Logistics.* – 2014. – Т. 16. – № 3. – Р. 343-369.
4. Varbanova A. *Current issues in operational planning of general cargo transportation on container feeder lines in the Black Sea region // Development.* – 2005. – 1995. – Р. 9.
5. Дрожжин О.Л. *Основні задачі організації і управління роботою суден на фідерних лініях // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.* – № 3. – 2017. – С. 68-73.

6. *Robinson R. Spatial structuring of port-linked flows. The Port of Vancouver. – Canada, 1965: PhD Thesis. – University of British Columbia. – 1968. – P. 271.*
7. *Ducruet C. (ed.). Maritime networks: spatial structures and time dynamics. – Routledge. – 2015. – P. 384.*
8. *Koi Yu Adolf Ng., Ducruet C. The changing tides of port geography (1950–2012) // Progress in Human Geography. – 2014. – Т. 38. – №. 6. – P. 785–823.*
9. *Канторович Л. В., Гавурин М. К. Применение математических методов в вопросах анализа грузопотоков // Сб. Проблемы повышения эффективности работы транспорта. Изд-во АН СССР. – 1949. – С. 110–138.*
10. *Панарин П.Я. Организация работы линейного флота / П.Я. Панарин. – М.: Транспорт, 1980. – 192 с.*
11. *Gunn W.A. Systems Simulation of Airline Operations. Operations Research, 12, 1. – 1964. – P. 206–229.*
12. *Kondo J. Airline Systems Simulation: A Computer System // Jour. Op. Res. Soc. Japan. – 1968. – Т. 10. – С. 145–155.*
13. *Вишневецький Д.О. Методичні основи організації роботи універсальних суден на міжнародних лініях: Дис. канд.: 05.22.01 / Вишневецький Д.О. – Одеса, 2016. – 171 с.*
14. *Fighting customs fraud: JRC research leads to new legislation. EU SCIENCE HUB. The European Commission's science and knowledge service. 08.08.2015. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/fighting-customs-fraud-new-legislation> (дата звернення 17.11.2017 р.).*
15. *<https://my.maerskline.com> [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Book – Book New Shipment – Режим доступу: <https://my.maerskline.com> (дата звернення 17.11.2011).*
16. *Шубаев А.Г. Подготовка и обоснование решений по управлению перевозками и работой флота морской судоходной компании / А.Г. Шубаев. – Одесса: ХОРС, 1998. – 208 с.*

*Стаття надійшла до редакції 08.12.2017*

### **Рецензенти:**

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Менеджмент, маркетинг і логістика» Одеського національного морського університету **М.Я. Постан**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету **О.Г. Шубаєв**

УДК 656.6

О.Д. Вишневская

**МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЮДЖЕТА ВРЕМЕНИ СУДОВ  
ПО ДОЛГОСРОЧНЫМ ФРАХТОВЫМ КОНТРАКТАМ  
В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ  
ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА**

*Разработана экономико-математическая модель оптимизационной задачи с интервальной неопределенностью, которая позволяет осуществлять распределение бюджета времени судов по долгосрочным фрахтовым контрактам с учетом возможности одновременной работы данных судов на открытом фрахтовом рынке. Интервальная неопределенность заключается в том, что параметры транспортного процесса, технико-эксплуатационные показатели работы судов и объемы транспортной работы представлены в виде диапазонов (интервалов), что соответствует реальной ситуации при принятии решений по управлению работой судов в рамках годового отрезка времени.*

**Ключевые слова:** долгосрочные фрахтовые контракты, бюджет времени, интервальная неопределенность, оптимизация.

*Розроблено економіко-математичну модель оптимізаційної задачі з інтервальною невизначеністю, яка дозволяє здійснювати розподіл бюджету часу суден за довгостроковими фрахтовими контрактами з урахуванням можливості одночасної роботи цих суден на відкритому фрахтовому ринку. Інтервальна невизначеність полягає в тому, що параметри транспортного процесу, техніко-експлуатаційні показники роботи суден і обсяги транспортної роботи представлені у вигляді діапазонів (інтервалів), що відповідає реальній ситуації при прийнятті рішень з управління роботою суден в рамках річного відрізка часу.*

**Ключові слова:** довгострокові фрахтові контракти, бюджет часу, інтервальна невизначеність, оптимізація.

*An optimization model with interval uncertainty is developed for distributing the time budget of ships for contracts of affreightment, taking into account the possibility of these vessels simultaneous work on the open freight market. Interval uncertainty lies in the fact that the transport process parameters, the technical and operational characteristics of the ships and the volume of the transport work are presented in the form of intervals, this corresponds to the actual situation when making decisions to manage the vessels work within an annual time interval.*

**Keywords:** contracts of affreightment, time budget, uncertainty of intervals, optimization.

**Введение.** В процессах управления работой флота возникает необходимость распределения транспортной работы между судами: под транспортной работой в данном случае понимается перевозка заданных грузов между заданными портами или в рамках выделенного региона, или в рамках конкретной схемы работы судов (линии).

Решение подобных задач связано с закреплением судов между конкретными видами транспортной работы с целью обеспечения, как правило, максимального финансового результата (прибыли) с учетом освоения необходимого объема транспортной работы. Основная идея данного распределения заключается в максимизации эффективности использования судов с конкретными характеристиками и технико-экономическими показателями в процессе предоставления транспортных услуг.

Долгосрочные фрахтовые контракты обладают определенной спецификой, в том числе отсутствием в большинстве случаев четкого задания портов захода и объема грузопотоков. Также при выполнении обязательств перед грузовладельцами по данным контрактам может возникнуть необходимость привлечения судов на условиях тайм-чартера в ситуации, когда собственные суда заняты на перевозках грузов на свободном фрахтовом рынке.

В таком контексте распределение судов между специфическими видами транспортной работы не рассматривалось в научных публикациях, тем не менее, практическая необходимость решения подобной задачи существует.

**Анализ литературы и выделение нерешенной части проблемы.** Следует отметить, что распределительные задачи (или задачи о назначениях) являются классическими задачами исследования операций и, в частности, нашли широкое применение в сфере принятия решений по управлению работой флота. В качестве примера можно привести модели, представленные в [1-3]. Как правило, в подобных задачах суда распределяются по обслуживаемым грузопотокам или схемам (для линейного судоходства).

Практическое большинство существующих моделей опираются на детерминированный вариант задания условий работы судов, так как разрабатывались: 1) в период плановой экономики (отечественная научная школа); 2) для ситуации линейного судоходства с ориентацией на четко заданное множество портов захода, конкретное расписание и усредненный вариант загрузки судна.

Вероятностные модели для решения задач, связанных с распределением судов, как правило, используются для долгосрочного (более одного года) планирования. В частности, в [4] рассматривалась задача распределения судов между регионами работы и между двумя вариантами коммерческой эксплуатации с учетом вероятностной природы фрахтовых ставок (за основу были приняты результаты статистических исследований, обосновавших правомерность использования нормального закона распределения колебаний фрахтовых ставок).

Коммерческо-правовые аспекты долгосрочных фрахтовых контрактов рассматривались в [1; 5]. Несмотря на обращение современных исследователей к задачам, связанным с управлением работой судов (например, [6; 7]), проблема учета специфики данных контрактов в принятии решений по управлению работой судов и, в частности, распределение бюджета времени в условиях наличия нескольких контрактов, практически не рассматривается.

**Цель исследования.** Разработка модели распределения бюджета времени судов по долгосрочным фрахтовым контрактам с учетом неопределенности параметров транспортного процесса.

**Результаты.** Для идентификации неопределенности параметров транспортного процесса при работе судов по долгосрочным фрахтовым контрактам, проанализируем источники формирования неопределенности.

Выделяют следующие основные виды долгосрочных фрахтовых контрактов [1; 5; 8]:

- Consecutive voyages – последовательные рейсы;
- COA (contract of affreightment) – договор фрахтования: volume contract of affreightment (фрахтовый контракт на определенный объем), volume contract (контракт на определенный объем), quantity contract (контракт на определенное количество). Указанные названия являются различными вариантами названий контрактов на транспортное обслуживание.

Основные позиции таких договоров, которые являются источником неопределенности условий работы судов (так как не устанавливаются четко), следующие:

- размер судна;
- количество груза / количество рейсов;
- порты загрузки;
- порты разгрузки.

Рассмотрим более детально каждый из указанных источников неопределенности.

Если в договоре рейсового чартера, как правило, указывается конкретное судно, то в долгосрочных контрактах на транспортное обслуживание могут указываться [5]:

- 1) размер судна (например, судно грузоподъемностью около 10000 т);
- 2) диапазон размера судна (например, судно грузоподъемностью от 20000 т до 25000 т).

Поэтому судовладелец может организовать обслуживание грузопотоков по долгосрочным контрактам так, что будут задействованы несколько судов подходящего размера. При этом достаточно часто возникают ситуации, когда для выполнения своих обязательств судовладельцу приходится брать суда в аренду:

а) в тайм-чартер на определенный период;

б) в тайм-чартер на рейс – в тех ситуациях, когда необходимо привлечь судно для работы по контракту, а принадлежащие судовладельцу суда задействованы на других перевозках.

Поэтому неопределенность с количеством рейсов или количеством груза по контрактам является, с одной стороны, для судовладельца возможностью параллельной работы на фрахтовом рынке на условиях рейсового чартера, с другой стороны – влечет риски и необходимость выполнения обязательств в тот момент, когда все суда заняты перевозками грузов других фрахтователей.

Таким образом, основным фактором неопределенности для судовладельцев, потенциально обуславливающим ситуации риска и приводящим к снижению эффективности обслуживания грузопотоков по долгосрочным контрактам, является объем транспортной работы, который, как известно, определяется *количеством груза и расстоянием перевозок*.

Обобщение вышеизложенного позволяет сформировать схематично систему факторов неопределенности и их возможное негативное влияние на параметры производственного процесса и эффективность работы судов в целом (рисунок).

Отметим, что для долгосрочных фрахтовых контрактов специфика условий обуславливает диапазон параметров транспортного процесса, в пределах которого говорить о конкретном виде закона распределения достаточно затруднительно, потому как данные в большинстве случаев нельзя считать однородными, так как они относятся к разным парам портов.

Таким образом, в данной ситуации имеет место интервальная неопределенность. В [9; 10] был предложен метод решений оптимизационных задач, у которых в целевой функции и ограничениях присутствуют интервальные показатели.

Примем за основу предлагаемый подход и сформулируем модель оптимизации распределения судов между долгосрочными контрактами в условиях интервальной неопределенности.

Введем обозначения:

$i = \overline{1, m}$  – индексы судов компании, каждое судно характеризуется

$R_i$  – суточным нормативом постоянных затрат (долл./сут.);

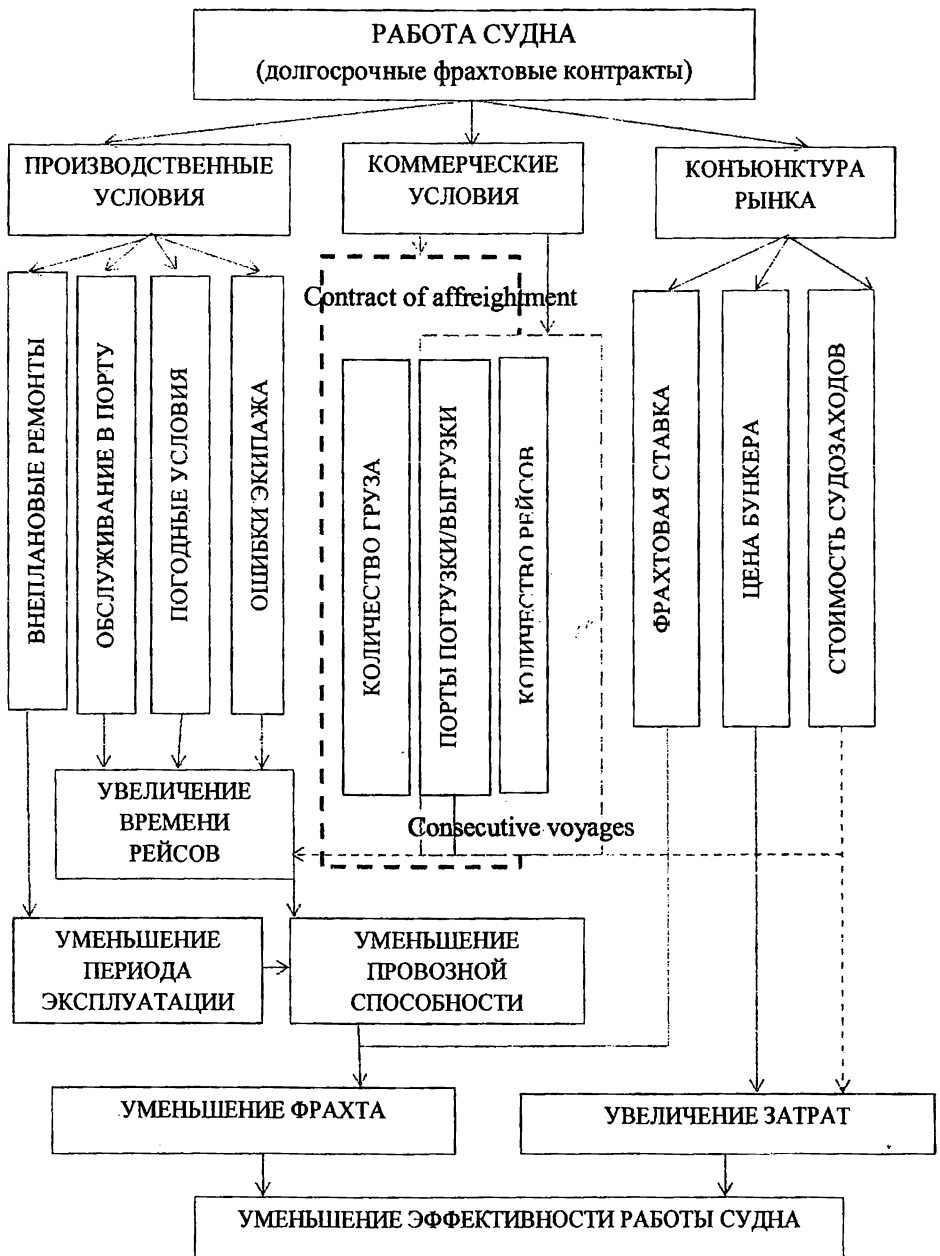
$j = \overline{1, n}$  – индексы рассматриваемых долгосрочных фрахтовых контрактов.

Каждый контракт характеризуется:

$\tilde{Q}^j = [Q_1^j; Q_2^j]$  – диапазоном значений объема перевозок, т;

$f_j$  – значением фрахтовой ставки, долл./т (или  $\tilde{f}^j = [f_1^j; f_2^j]$  – диапазоном значений фрахтовой ставки, долл./т.





*Рис. Система факторов неопределенности и их влияние на результаты работы судна в долгосрочном периоде*

Работа судов по контрактам характеризуется следующими технико-эксплуатационными показателями:

$\tilde{r}_{ij} = [r_{ij}^1; r_{ij}^2]$  – диапазон значений эксплуатационных затрат при работе  $i$ -го судна по  $j$ -ому контракту, долл./сут.;

$\tilde{p}_{ij} = [p_{ij}^1; p_{ij}^2]$  – диапазон значений провозной способности  $i$ -го судна при работе по  $j$ -ому контракту, тыс.т/год.

Обозначим  $x_{ij}, 0 \leq x_{ij} \leq 1$  – доля от бюджета времени работы  $i$ -го судна по  $j$ -ому контракту. Так как не каждое судно из рассматриваемого множества может работать на конкретном контракту (например, грузовая партия не подходит по размеру для данного судна), то в такой ситуации отдельные  $x_{ij}$  из параметров управления трансформируются в экзогенные параметры и принимаются равными 0. Такая процедура позволит исключить из дальнейшей оптимизации «невозможные» варианты закрепления судов.

Также компания может для реализации своих планов по обслуживанию долгосрочных фрахтовых контрактов привлекать суда на базе тайм-чартерной аренды по ставкам  $r_k^{t-ch}, k = \overline{1, K}$ ,

где  $k$  – судно (прототип);

$K$  – множество рассматриваемых вариантов судов.

Обозначим

$x_k^{t-ch}, k = \overline{1, K}$  – количество судов-претендентов (прототипов судов-претендентов) для аренды в тайм-чартер;

$x_{kj}^{t-ch}, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, n}$  – доля бюджета времени работы  $k$ -го судна по  $j$ -ому контракту.

Аналогично представленным выше рассуждениям, если судно  $x_k^{t-ch}$  не может обслуживать  $j$ -ый контракт, то в процессе оптимизации соответствующие  $x_{kj}^{t-ch}$  полагаются равными 0 и рассматриваются далее в качестве экзогенных параметров.

Отметим, что суда компании (собственные или арендованные) могут работать на открытом фрахтовом рынке, который характеризуется диапазоном значений фрахтовых ставок (с учетом специфики судов, в том числе дедвейта, возраста и т.п.), которые определяют следующий диапазон усредненного тайм-чартерного эквивалента в регионе:

$\tilde{E}_i = [\tilde{E}_i^1, \tilde{E}_i^2], i = \overline{1, m}$  – для собственных судов, долл./сут.

$\tilde{E}_k = [\tilde{E}_k^1, \tilde{E}_k^2], k = \overline{1, K}$  – для арендованных судов, долл./сут.

Рассматриваемый период долгосрочных контрактов –  $T$ , сут.

В качестве целевой функции будем рассматривать максимизацию финансового результата (диапазона финансового результата – в терминах интервальной оптимизации) работы судов (собственных и арендованных) по долгосрочным контрактам:

$$\begin{aligned} \tilde{F}(x_{ij}, x_k^{t-ch}, x_{kj}^{t-ch}) = & \sum_{j=1}^n (\tilde{f}^j \cdot (\sum_{i=1}^m \tilde{p}_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{kj}^{t-ch} \cdot x_{kj}^{t-ch}) - \\ & - \sum_{i=1}^m (\tilde{r}_{ij} \cdot x_{ij} - R_i) - \sum_{k=1}^K \tilde{r}_{kj}^{t-ch} \cdot x_{kj}^{t-ch}) - \sum_{k=1}^K r_k^{t-ch} \cdot T \cdot x_k^{t-ch} + \\ & + \sum_{i=1}^m \tilde{E}_i \cdot T \cdot (1 - \sum_{j=1}^n x_{ij}) + \sum_{k=1}^K \tilde{E}_k^{t-ch} \cdot T \cdot (x_k^{t-ch} - \sum_{j=1}^n x_{kj}^{t-ch}) \rightarrow \max \end{aligned} \quad (1)$$

Составляющие (1):

$\sum_{j=1}^n (\tilde{f}^j \cdot (\sum_{i=1}^m \tilde{p}_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{kj}^{t-ch} \cdot x_{kj}^{t-ch})$  – фрахт от работы судов (собственных и арендованных) по контрактам (диапазон фрахта);

$\sum_{i=1}^m (\tilde{r}_{ij} \cdot x_{ij} - R_i)$  – расходы эксплуатационные и постоянные собственных судов компании (диапазон расходов);

$\sum_{k=1}^K \tilde{r}_{kj}^{t-ch} \cdot x_{kj}^{t-ch}$  – расходы эксплуатационные арендованных судов (диапазон расходов);

$\sum_{k=1}^K r_k^{t-ch} \cdot T \cdot x_k^{t-ch}$  – расходы по аренде в тайм-чартер;

$\sum_{i=1}^m \tilde{E}_i \cdot T \cdot (1 - \sum_{j=1}^n x_{ij})$  – эффективность (диапазон эффективности)

работы собственных судов вне долгосрочных контрактов – на открытом фраховом рынке;

$1 - \sum_{j=1}^n x_{ij}$  – доля бюджета времени работы собственных судов вне

долгосрочных контрактов;

$\sum_{k=1}^K \tilde{E}_k^{t-ch} \cdot T \cdot (x_k^{t-ch} - \sum_{j=1}^n x_{kj}^{t-ch})$  – эффективность (диапазон эффективности)

работы арендованных судов вне долгосрочных контрактов – на открытом фраховом рынке;

$x_k^{t-ch} - \sum_{j=1}^n x_{kj}^{t-ch}$  – доля бюджета времени работы арендованных

судов вне долгосрочных контрактов.

Сформулируем ограничения модели.

По объему транспортной работы по долгосрочным контрактам (для каждого контракта)

$$\sum_{i=1}^m \tilde{p}_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{kj}^{t-ch} \cdot x_{kj}^{t-ch} \leq \tilde{Q}^j, j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

По бюджету времени собственных судов компании

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, i = \overline{1, m}. \quad (3)$$

По бюджету времени арендованных судов

$$\sum_{j=1}^n x_{kj}^{t-ch} \leq x_k^{t-ch}, k = \overline{1, K}. \quad (4)$$

По количеству арендованных судов

$$x_k^{t-ch} \leq N_k, k = \overline{1, K}, \quad (5)$$

где  $N_k$  – возможное количество судов для аренды.

Условие целочисленности и неотрицательности параметров управления

$$x_k^{t-ch} \in Z^+, k = \overline{1, K}. \quad (6)$$

Условие неотрицательности параметров управления

$$x_{kj}^{t-ch} \geq 0, x_{ij} \geq 0, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Диапазон возможных значений количества собственных судов

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Данная модель позволяет устанавливать:

1) закрепление судов компании за долгосрочными контрактами – с выделением того, какую долю времени из их бюджета суда будут осуществлять перевозки по данным контрактам, а какую долю бюджета времени будут работать на свободном фрахтовом рынке;

2) количество судов конкретного типа, которые необходимо взять в тайм-чартерную аренду для осуществления всего планируемого объема транспортной работы;

3) закрепление арендованных судов за долгосрочными контрактами, а также долю бюджета времени, в рамках которой арендованные суда будут работать на открытом фрахтовом рынке.

При этом будет обеспечиваться максимальный финансовый результат – прибыль от эксплуатации.

Указанные результаты отвечают неопределенности условий, сформулированных в виде интервалов возможных значений технико-эксплуатационных показателей, а также характеристик долгосрочных контрактов и ситуации на фрахтовом рынке.

Для решений моделей, относящихся к моделям с интервальной неопределенностью, разработаны специальные методы, которые, в частности, представлены в [9; 10] и могут быть использованы для решений данной задачи.

**Выводы.** Разработана экономико-математическая модель оптимизационной задачи с интервальной неопределенностью, которая позволяет осуществлять распределение бюджета времени судов (закрепление судов компании и арендованных судов) по долгосрочным фрахтовым контрактам с учетом того, что в «свободное» от работы по данным контрактам время, суда могут работать на открытом фрахтовом рынке.

Интервальная неопределенность заключается в том, что параметры транспортного процесса, технико-эксплуатационные показатели работы судов и объемы транспортной работы представлены в виде диапазонов (интервалов), что соответствует реальной ситуации при принятии решений по управлению работой судов в рамках годового отрезка времени.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лапкин А.И. Организация и управление работой флота последовательными рейсами: Монография / А.И. Лапкин. – Одесса, 2000. – 200 с.
2. Шibaев А.Г. Подготовка и обоснование решений по управлению перевозками и работой флота морской судоходной компании: Учебн. пособие / А.Г. Шibaев. – Одесса: ХОРС, 1998. – 208 с.
3. Левый В.Д. Оперативное управление работой флота / В.Д. Левый. – М.: Транспорт, 1981. – 157 с.
4. Онищенко С.П. Специфика рыночных рисков и мероприятий по их снижению в современном судоходном бизнесе / С.П. Онищенко, Т.Н.Шутенко // Актуальні проблеми економіки. – № 2 (128). – 2012. – С. 85-98.
5. Gorton L. Volume Contracts of Affreightment – Some Features and Principles. – Stockholm Institute for Scandianvian Law, 2010. – 91 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.scandinavianlaw.se/pdf/46-3.pdf>
6. Лапкін О.І. Визначення варіанту експлуатації суден обмежених районів плавання в регіоні Чорного та Середземного морів / О.І. Лапкін // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Вип. 4(46). – Одеса: ОНМУ, 2015. – С. 86-97.

7. Лапкин А.И. Эффективность отфрахтования судна на условиях рейсового тайм-чартера / А.И. Лапкин, И.А. Лапкина // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – № 4 (234). – 2017. – С. 134-137.
8. *Implied obligations in a contract of affreightment* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://catalogue.pearsoned.co.uk/assets/hip/gb/hip\\_gb\\_pearsonhighered/samplechapter/Wilson\\_CO\\_GBS\\_CO2.pdf](https://catalogue.pearsoned.co.uk/assets/hip/gb/hip_gb_pearsonhighered/samplechapter/Wilson_CO_GBS_CO2.pdf)
9. Левин В.И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации / В.И. Левин // Автоматика и вычислительная техника. – 2012. – № 4. – С. 157-163.
10. Левин В.И. Упрощенный подход к оптимизации в условиях интервальной неопределенности / В.И. Левин // Вестник УлГТУ. – 2013. – № 2 (62). – С.36-44.

*Стаття надійшла до редакції 20.10.2017*

**Рецензенти:**

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Комерційне забезпечення транспортних процесів» Одеського національного морського університету **С.П. Онищенко**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету **О.Г. Шибяев**

УДК 656.613.2.:656.612.022.5

О.В. Щербина

### АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ОЗНАК У БАРЖЕ-БУКСИРНІЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ

*На базі аналізу сучасних методів експлуатації барже-буксирних суден внутрішнього, морського і змішаного ріка-море плавання та існуючих класифікацій визначені основні класифікаційні ознаки і створена класифікація барже-буксирних суден, адаптована до сучасних умов.*

*Отримані результати дозволяють акцентувати увагу на виявленні особливостей експлуатації та архітектурно конструктивних особливостей барже-буксирних суден залежно від умов плавання.*

*Ключові слова:* класифікація, барже-буксирні судна, ознаки, район плавання.

*На базе анализа современных методов эксплуатации барже-буксирных судов внутреннего, морского и смешанного река-море плавания и существующих классификаций определены основные классификационные признаки и создана классификация барже-буксирных судов, адаптированная к современным условиям.*

*Полученные результаты позволяют акцентировать внимание на выявление особенностей эксплуатации и архитектурно конструктивных характеристик барже-буксирных судов в зависимости от условий плавания.*

*Ключевые слова:* классификация, барже-буксирные суда, признаки, район плавания.

*Based on the analysis of modern methods of operation tug barge vessel, sea and river-sea vessels and existing classifications identified the main classification features and classification created tug barge vessel, adapted to modern conditions.*

*The results allow to focus on identifying the characteristics and operation of architectural design tug barge vessel depending on the voyage.*

*Keywords:* classification, tug barge vessel, signs, navigation area

**Вступ.** Наявна класифікація, яка використовується в барже-буксирних перевезеннях в даний час, розроблена ще в період їх становлення. Вона не відображає повною мірою сучасну практику експлуатації барже-буксирних суден (ББС), як на морській ділянці, так і в умовах річкового та змішаного «ріка-море» плавання. Дана обставина зумовила необхідність систематизувати класифікаційні ознаки і адаптувати їх до сучасних умов експлуатації в різних умовах плавання.

На підставі аналізу специфіки роботи ББС при плаванні в умовах відкритого моря, по внутрішніх водних шляхах та змішаного «ріка-море» плавання, з метою більш чіткого і наочного уявлення про окремі їх типи, необхідно систематизувати класифікаційні ознаки і встановити взаємозв'язок між ознакою і типом ББС за районом плавання.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** Питання ефективної експлуатації, порівняльний аналіз основних переваг ББС внутрішнього, змішаного і необмеженого плавання, а також їх класифікація розглянуті в роботах багатьох авторів. Класифікація ББС з різних позицій розглянуті в роботах Лобастова В.П., Богданова Б.В., Єгорова О.Г., Снопкова В.І., Союзова А.А., Зачесова В.П., Роннова Є.П., Казакова Н.Н., Сторожева Н.Ф. [1-9], однак не всі вони досліджували дане питання з позиції комерційної експлуатації. Крім того, жоден з авторів не класифікував ББС з позиції експлуатації їх в різних районах плавання.

У працях Богданова Б.В. [1; 2], Казакова Н.Н. [5], Снопкова В.І. [8], Союзова А.А. [9], Зачесова В.П. [4] представлена узагальнена класифікація суден. Класифікація ББС, що штовхаються, з позиції застосування різних зчіпних пристроїв, широко висвітлена в працях Лобастова В.П. [6], Сторожева Н.Ф. [10].

**Мета дослідження.** На підставі аналізу специфіки роботи ББС при плаванні в умовах відкритого моря, по внутрішніх водних шляхах та змішаного «ріка-море» плавання, з метою більш чіткого і наочного уявлення про окремі їх типи, необхідно систематизувати класифікаційні ознаки і встановити взаємозв'язок між ознакою і типом ББС за районом плавання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Базисом при побудові класифікації в роботах Роннова Є.П. [7] і Єгорова О.Г. [3] виступають праці Богданова Б.В. [1], і наведена ним класифікація ББС внутрішнього плавання, що штовхаються, та морських складених суден за різними ознаками. Розширена класифікація ознак ББС, наведена в роботах вищезазначених авторів та адаптована до сучасних умов експлуатації, має наступний вигляд:

1) *за районом плавання* – судна морського, внутрішнього та змішаного плавання. Кожному класу властива певна форма та конструкція корпусу, тип зчіпного пристрою. Класифікація ББС за районом плавання представлена на рис.1;

2) *за формою корпусу вантажного модуля* – секційні та баржеві. Відповідно, склад, сформований із секцій, має назву «секційний», а з барж – «баржевий». Деякі автори в залежності від форми обводів виділяють окрему групу – «напівсекційні склади». Такі несамохідні вантажні судна повинні мати підйом днища на стику транцевих обводів. При цьому вважаються секційним складами тільки такі склади, в яких такий підйом відсутній;



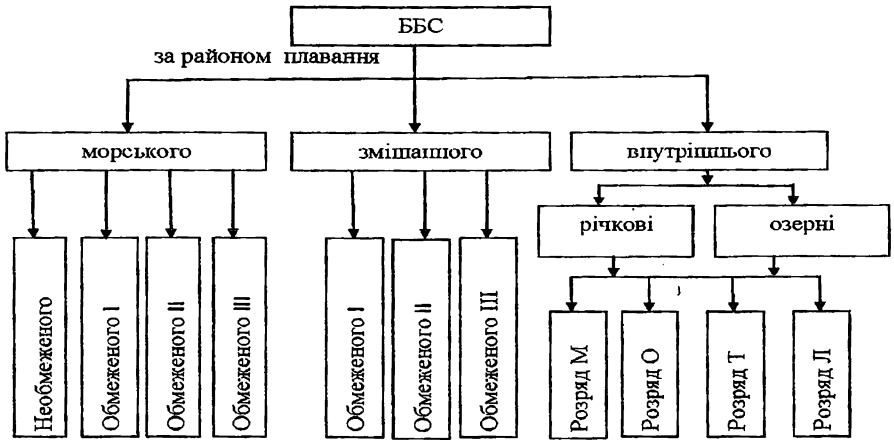


Рис. 1. Класифікація барже-буксирних суден за районом плавання

3) *за принципом експлуатації* – маршрутні та збірні. «Маршрутними» називаються склади, якщо перевезення здійснюються тільки між кінцевими пунктами без переформування, відвантаження та довантаження в проміжному порту. Найбільш ефективними при роботі на лініях є великовантажні секційні склади. «Збірними» називаються склади, число суден в яких може змінюватися під час перевезення;

4) *за навантаженням на одиницю потужності* – великовантажні та невеликовантажні. Великовантажними називають склади, що повноцінно використовують гарантовані габарити шляху. Залежно від особливостей конкретного водного шляху оптимальна вантажопідйомність великовантажних складів різна;

5) *за типом зчпного пристрою* – жорсткий склад, напівжорсткий склад, гнучкий склад. Жорсткий склад характеризується тим, що в процесі повороту його діаметральна площа (ДП) практично зберігається прямолінійною;

Можливість водіння великотоннажних ББС може бути істотно розширена в разі застосування зчпних пристроїв, що допускають вигин складу в горизонтальній площині, який забезпечується у напівжорсткому складі. В цьому випадку судна управляються на додаток до рульового комплексу штовхача встановленими між суднами зчпними пристроями. Ці пристрої допускають відхилення ДП секцій на величину, необхідну для проходження криволінійних ділянок річкового шляху;

6) *за кількістю суден у складі* – багатобаржеві, багатосекційні, однобаржеві. В практиці експлуатації секційні склади не формуються з однієї секції, в той же час кількість барж (секцій) в ББС може бути різною і залежить від різних факторів;

7) *за призначенням складу* – спеціалізовані, змішані. Спеціалізовані склади формуються з барж (секцій) одного призначення, змішані – з барж (секцій) різного призначення;

8) *за способом водіння* – що штовхаються, що буксируються. Залежить від типу самохідного судна. Якщо буксирування барж, складів з барж здійснює «буксир» («тягач»), то транспортування як правило, виконується способом буксирування на тросі «за собою». Якщо «штовхач» – то водіння складу здійснюється методом штовхання. Слід зазначити, що «буксир-штовхач» призначений для транспортування складів з барж (секцій) як методом буксирування, так і методом штовхання. У цьому випадку спосіб водіння залежить від умов рейсу;

9) *за способом формування складу* – кильватерний, пижевий. Кильватерний (одноритковий), пижовий (дворитковий). Застосовуються й інші форми складів, що представляють собою комбінацію кильватерних счалів з пижами при різному розташуванні їх по відношенню до напрямку руху складу;

10) *за конструктивним типом кормової кінцевості баржі* – склади з транцевим упором, склади з врзним упором;

11) *за призначенням ББС* – універсальні та спеціалізовані. Універсальні ББС призначені для перевезення генерального вантажу. Спеціалізовані ББС використовуються для перевезень техніки, тварин, деяких сипучих і нафтоналивних вантажів;

12) *за ступенем закриття барж (секцій)* – відкриті, напіввідкриті й закриті. Відкритими називаються судна трюмного або бункерного типу, а також судна-майданчики, на яких всі вантажні операції можуть бути здійснені береговими кранами або судовими вантажними пристроями без використання внутрішньотрюмних машин або ручної праці. Коефіцієнт вертикальної проникності таких суден близький до одиниці.

Напіввідкритими називаються судна, на яких перевантажувальні роботи можуть здійснюватися механізованим способом. В цьому випадку при штивуванні та підгортанні вантажу до просвіту люка використовується ручна праця. Підпалубні «кишені» таких суден більше 1 м, а коефіцієнт вертикальної проникності змінюється в межах від 0,2 до 0,5.

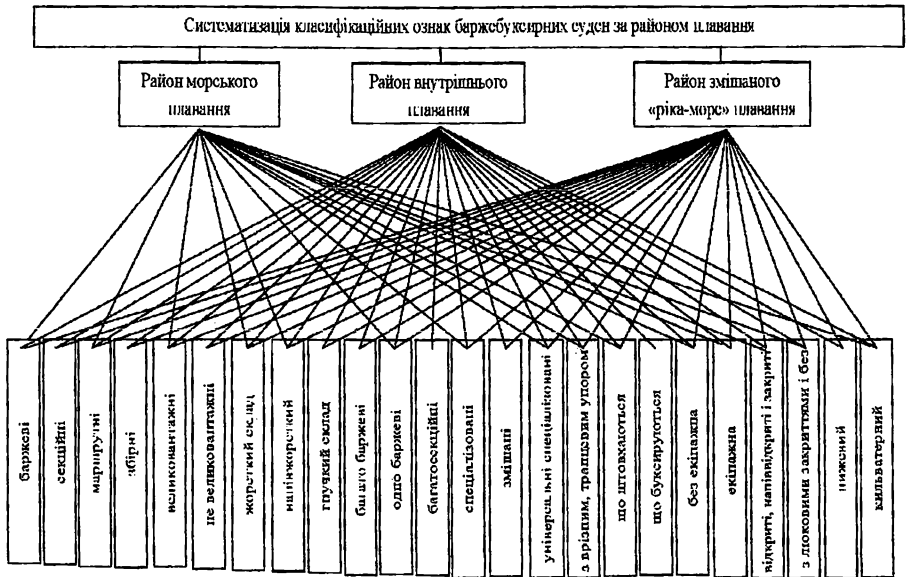
Закритими називаються судна, на яких основний обсяг вантажних робіт в трюмах здійснюється вручну. Коефіцієнт вертикальної проникності менше 0,2;

13) *за ступенем закриття вантажного обсягу* – з люковими закриттями і без люкових закриттів. До суден з люковими закриттями відносять судна трюмного або бункерного типу, обладнані водно- або бризконепроникними люковими закриттями. Це суховантажні баржі, що застосовуються для перевезень вантажів, які вимагають захисту від атмосферних опадів. Трюм може закриватися тентом, знімними або зсувними кришками.

На ББС без люкових закриттів перевозять вантажі, які за своїми фізико-хімічними властивостями не вимагають захисту від атмосферних опадів (лісоматеріалів, кам'яного вугілля, руди, мінерально-будівельних матеріалів, контейнерів, тарно-штучних вантажів в упаковці і ін.);

14) *за наявністю екіпажу на баржі* – екіпажна і безекіпажна.

**Результати досліджень.** При вивченні специфіки роботи ББС прийшли до висновку, що класифікаційні ознаки знаходяться в прямій залежності від району плавання. У зв'язку з цим виконана систематизація класифікаційних ознак ББС за районом плавання: морські ББС, внутрішнього плавання, змішаного ріка-море плавання. Наочно диференціація класифікаційних ознак ББС за районом плавання представлена на рис. 2. Це дає більш чітке і наочне уявлення про можливість використання окремих типів суден на певних маршрутах перевезень.



*Рис. 2. Систематизація класифікаційних ознак барже-буксирних суден за районом плавання*

**Висновок.** Систематизація класифікаційних ознак відбувалася з точки зору можливості експлуатації ББС в різних районах плавання. Встановлений зв'язок між ознакою і типом ББС за районом плавання дозволив визначити наступне:

- для роботи на морських шляхах недоцільно використовувати секційні, збірні, невеликвантажні, гнучкі, багатобаржеві, багатосекційні та змішані ББС;
- всі типи ББС в цілому, а також окремі частини, можуть бути використані при роботі на внутрішніх водних шляхах, однак, ефективність роботи при цьому потребує додаткового ретельного обґрунтування;
- для роботи у змішаному «ріка-море» районі плавання не можна використовувати багатосекційні склади та склади що буксуються.

Проведене дослідження матиме подальший розвиток при вирішенні задач, пов'язаних з визначенням типів ББС для планування роботи суден в барже-буксирній ТТС.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богданов Б.В., Алчуджан Г.А., Жинкин В.Б. Проектирование толкаемых составов и составных судов. – Л.: Судостроение, 1981. – 224 с.
2. Богданов Б.В., Слуцкий А.В., Шмаков М.Г., Васильев К.А., Соркин Д.Х. Буксирные суда (проектирование и конструкция). – Л.: Судостроение, 1974. – 280 с.
3. Егоров А.Г. Особенности современных барже-буксирных составов внутреннего и смешанного плавания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/ URL: http://conference.nios.edu.ua](http://www/URL: http://conference.nios.edu.ua)
4. Зачесов В.П. Лекции по ОРФ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://yakutyani.narod.ru>
5. Казаков Н.Н. Организация работы речного флота: Учебн. пособие / Н.Н. Казаков. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 294 с.
6. Лобастов В.П. Особенности проектирования транспортных систем смешанного (река-море) сообщения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / В.П. Лобастов. – 2010. – № 3 (82). – С. 180-185.
7. Роннов Е.П. Особенности проектирования толкаемых составов внутреннего плавания: Метод. пособие / Е.П. Роннов, В.И. Любимов. – Н. Новгород: Изд-во ГОУ ВПО ВГАВТ, 2004. – 28 с.
8. Снопков В.И. Эксплуатация специализированных судов: Учебн. пособие / В.И. Снопков. – М.: Транспорт, 1987. – 288 с.
9. Союзов А.А. Организация и планирование работы морского флота: Учебн. пособие / А.А. Союзов. – М.: Морской транспорт, 1979. – 416 с.
10. Сторожев Н.Ф. Автосцепы речных судов / Н.Ф. Сторожев, Н.Ф. Мейер. – М.: Транспорт, 1969. – 256 с.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2017

### Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету **О.Г. Шибасєв**

доктор технічних наук, професор кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету **В.П. Сторожев**

УДК 656.615.078.111/.117

А.О. Мурад'ян, С.С. Русанова

ОБГРУНТУВАННЯ ПІДХОДУ  
ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УЗГОДЖЕНОГО УПРАВЛІННЯ  
ТРАНСПОРТНИМИ ВУЗЛАМИ

*У статті запропоновано оригінальний підхід до забезпечення погодженого управління транспортними вузлами, заснований на сполученні методології класичної науки оптимального управління й конструктивними ідеями прогресуючих у цей час нових концепцій ділового поводження й соціального управління. При цьому встановлено, що реалізацію запропонованого підходу необхідно здійснювати у два етапи: спочатку необхідно погодити параметри процесу перевалки вантажів, а потім забезпечити здійснення цього процесу в оптимальному режимі.*

**Ключові слова:** транспортний вузол, перевалка вантажів, оптимальне управління, партнерська взаємодія, оптимізація вантажопереваловального процесу.

*В статье предложен оригинальный подход к обеспечению согласованного управления транспортными узлами, основанный на сочетании методологии классической науки оптимального управления и конструктивных идей прогрессирующих в настоящее время новых концепций делового поведения и социального управления. При этом установлено, что реализацию предлагаемого подхода необходимо осуществлять в два этапа: вначале необходимо согласовать параметры процесса перевалки грузов, а затем обеспечить осуществление этого процесса в оптимальном режиме.*

**Ключевые слова:** транспортный узел, перевалка грузов, оптимальное управление, партнерское взаимодействие, оптимизация грузо-перевалки.

*In this article, an original approach to ensuring the coordinated transport hub management, based on combining the methodology of classical science of optimal management and constructive ideas, new progressive concepts of business conduct in conjunction with the social management theory was proposed.*

*It was found that the proposed approach should be realized in two stages: first it is necessary to coordinate cargo transshipment process parameters, and then ensure optimal implementation of this process.*

*The provisions set forth in the paper have theoretical significance since they are characterized by scientific novelty and are useful in practical terms as they improve operation efficiency both of transport hubs, and their customers.*

**Keywords:** transport hub, cargo transshipment, optimal management, partnership, transshipment optimization.

**Вступ.** На рубежі XX і XXI століть помітно активізувалися наукові дослідження в області комплексної теорії управління транспортом. Особливо чітко ця тенденція проявилася в дослідженнях, спрямованих на вдосконалення теорії і методів організації управління роботою пунктів стику суміжних видів транспорту як систем, що складаються з сукупностей взаємопов'язаних елементів [1] і іменувалися в той період транспортними вузлами (ТВ). Спочатку зазначені дослідження ґрунтувалися на уявленнях створеної в минулому столітті класичної теорії оптимального управління.

Потім під впливом загальносвітових тенденцій розвитку транспортної науки в дослідженнях українських і російських фахівців намітився відхід від принципів класичної науки управління з переорієнтацією на нові теорії ділової поведінки – транспортну логістику, маркетинг партнерських відносин в поєднанні з концепціями мережових форм міжфірмової кооперації, кластеризації, створення стратегічних альянсів, взаємодії бізнесу і влади.

У ці ж роки була актуалізована висловлена в [2] ідея створення в рамках морського порту регіону «морського транспортного вузла» [3; 4], під яким пропонувалося розуміти сукупність державних і приватних компаній, діяльність яких спрямована на обслуговування вантажо- і судновласників при здійсненні процесу перевалки вантажу (ППВ).

З вищевикладеного стає очевидним, що до теперішнього часу в дослідженні комплексних проблем організації управління транспортними вузлами склалася суперечлива ситуація. З одного боку, традиційна парадигма управління вузлами і трактування їх як ТВ офіційно не відкинута. З іншого боку, енергійно висувається ідея тлумачення вузлів в якості морських транспортних вузлів (МТВ) в єдності з переходом до використання для внутрішньовузлового управління згадуваних вище нових теорій ділової поведінки. При цьому в обох випадках у всіх зазначених вище роботах проблема побудови механізму узгодження управління в рамках ТВ (МТВ) в кращому випадку лише згадується.

Водночас зазначена проблема є однаково актуальною при використанні будь-якого підходу до управління транспортними вузлами, будь то методологія класичного оптимального управління, або філософія ринкової поведінки, або поєднання обох підходів і незалежно від того, як трактуються транспортні вузли – в якості ТВ або МТВ. У такій ситуації найбільш логічно зробити висновок, що саме цю проблему слід вважати першочерговою по важливості для побудови ефективного механізму управління ППВ в транспортних вузлах і визначити її опрацювання в якості найважливішого завдання цього дослідження.

**Постановка проблеми.** Вже з вищевикладеного неважко зробити висновок, що коректна постановка проблеми забезпечення узгодженого управління ППВ в ТВ можлива лише з позицій, що враховують її тісний зв'язок з актуальними науковими і практичними завданнями, які розв'язуються в загальнонаціональних проєктах. Про правомірність такого

твердження свідчить насамперед той факт, що більше половини часу транспортування вантажів припадає на їх перебування під вантажно-розвантажувальними операціями в пунктах навантаження, вивантаження і перевалки. При цьому витрати за зазначеними операціями приблизно в 4 рази перевищують витрати на вантажні перевезення магістральним транспортом.

Основна причина зазначених негативів у роботі транспорту криється в уповільненні просування вантажів аж до зупинки внаслідок виникнення і накопичення неузгодженості в роботі суміжних видів транспорту, що обумовлює несинхронне прибуття їх рухомого складу до ТВ. Саме з цієї причини з'являються «кинуті» поїзди, що відносяться до залізничних полігонів на території морських портів, введення конвенційних заборон і часткових обмежень на відвантаження в адресу портів масових вантажів, простої суден, вагонів і автомобілів з вантажами і в очікуванні вантажів, накопичення в портах незатребуваних вантажів. В результаті практично всі учасники логістичного ланцюга доставки вантажів і транспортного обслуговування зазнають втрат, що вимірюються в сукупній оцінці семизначними цифрами.

Наведені вище цифри говорять про той факт, що МТВ є «самою останньою» можливістю якщо не для ліквідації, то хоча б для часткового усунення «рухових» диспропорцій в роботі суміжних видів транспорту. А цього можна досягти лише, очевидно, лише за умови забезпечення максимально повної узгодженості роботи суміжних підприємств ТВ при спільній організації і здійсненні ППВ.

**Аналіз літературних даних.** Перш ніж перейти безпосередньо до аналітичного огляду літературних джерел, звернемо увагу на наступні дві обставини, важливі в методологічному плані. Перша з них пов'язана з наявністю різних підходів до формального подання транспортних вузлів. Дійсно, поряд з узагальненими поняттям ТВ, яке в повній мірі відображає комплексний (міжгалузевий виробничий) характер транспортних вузлів, деякі фахівці віддають перевагу МТВ, розглядаючи їх як об'єднання виробничих підприємств (стивідорних компаній) і сервісних організацій (експедиторських, агентських та інших компаній), а також державних органів і посередницьких структур [2]. Такий підхід, на нашу думку, не може мати однозначної оцінки. Дійсно, з одного боку включення до складу суб'єктів транспортних вузлів сервісних організацій видається цілком допустимим кроком. Однак, з іншого боку, виключення зі структури транспортних вузлів припортових залізничних станцій і рухомого складу суміжних видів транспорту веде по суті справи до відмови від поняття «транспортний вузол» як пункт «перетину» різних видів транспорту. А це, в свою чергу, обумовлює підміну міжсистемного вантажоперевалювального процесу локальним перевантажувальним процесом портів, з чим, очевидно, не можна погодитися в силу того, що механізми управління цими процесами ґрунтуються на різних вихідних передумовах.

З вищевикладеного стає очевидним, що вагомим підстав для переходу від поняття ТВ до поняття МТВ не існує об'єктивно. З цієї причини в цій статті далі мова піде тільки про ТВ за умови, що в їх структурі будуть представлені агентські та експедиторські компанії, які дійсно активно беруть участь в організації та здійсненні ППВ.

Друга обставина відображає зміни в орієнтації дослідників на методичний інструментарій, який використовується при побудові механізму управління реалізованим в ТВ вантажоперевалювальним процесом. Як вже зазначалося вище, прихильники класичної теорії управління протягом другої половини минулого століття акцентували увагу на побудові економіко-математичних моделей управління ППВ в термінах добре розвинених математичних дисциплін (математичного програмування, теорії масового обслуговування, календарного планування), а також імітаційного моделювання.

На початку поточного століття вони переорієнтувалися на висунуті західноєвропейськими вченими підходи до організації управління транспортними вузлами, заснованими на методичному арсеналі теорії взаємодіючих систем, морфологічного і когнітивного моделювання, штучного інтелекту системного програмування та мультиагентної оптимізації [5-8]. При цьому в обох випадках дослідники вкрай мало уваги приділяли проблемі забезпечення узгодженого управління ППВ.

У справедливості висловлених тверджень неважко переконатися, ознайомившись з публікаціями в досліджуваній області, виданими останнім часом.

Так, в дисертаційному дослідженні [9], виконаному в дусі класичної традиції глумачення управління, мова йде про ТВ, що складається всього з двох підприємств – порту (морського або річкового) і припортової залізничної станції. При цьому вантажоперевалка розглядається лише для одного етапу ППВ, який виконується в порту при завантаженні суден з вагонів, т.д. – тільки за прямим варіантом. Робота, що аналізується містить формальний опис ТВ (точніше лише його портової ланки) з використанням в якості методологічного інструменту теорії взаємодіючих послідовних процесів [10], тісно пов'язаною з теорією послідовних систем [11]. Такий підхід до формалізації процесу роботи ТВ представляється привабливим в теоретичному відношенні, бо дозволяє досить витончено відобразити процес завантаження суден. Разом з тим його практичну цінність не можна визнати високою внаслідок надмірно громіздкої процедури реалізації. Однак більш істотна особливість цього підходу полягає в розмитості його критеріальної основи і практично повній відсутності зв'язку з ринковою філософією ділової поведінки суб'єктів ТВ в стосунках як між собою, так і з клієнтурою.

В аналогічній постановці (для комплексу порт-станція і процесу завантаження суден в порту) виконана робота [12], в якій дано аналітичний огляд методичного арсеналу теорії оптимального управління з точки зору можливості і доцільності застосування існуючих методів для моде-



лювання роботи ТВ. За результатами проведеного аналізу зроблено висновок про те, що найбільш перспективними для цієї мети є методи когнітивного і морфологічного аналізу. Це твердження ілюструється в [12] академічним прикладом морфологічного моделювання процесу завантаження суден в порту, проте без будь-якої вказівки на спосіб реалізації отриманої таким чином моделі. Внаслідок цього питання про дійсну цінність запропонованого в характеризуемій роботі підходу залишається відкритим як з теоретичної, так і з практичної точок зору.

Рубіжною в певному сенсі є робота [13], в якій зроблена спроба з'єднати раціональні ідеї традиційного і нового підходів до організації управління ТВ. Перше з зазначених напрямків – традиційне – представлено в цій праці практично в тій же постановці, що і в [12] тобто з орієнтацією на вибір в якості відповідного методологічного засобу для побудови механізму управління ТВ морфологічного і когнітивного моделювання в поєднанні зі сценарним підходом до планування діяльності вузла. Другий і більш цінний напрямок – ринковий – відображено в [13] в формі обґрунтування одного з принципово можливих варіантів постановки проблеми узгодження інтересів суб'єктів ТВ в ході організації і здійснення ППВ. Ця частина, що міститься в даному дослідженні, виконана в поняттях теорії оцінки впливу зворотного зв'язку в механізмі управління на функціонування керованого об'єкта з рекомендацією про наступний перехід до реалізації методики векторної оптимізації ППВ в рамках ТВ. При цьому всі зазначені ідеї розглянуті, як прийнято говорити, лише в порядку постановки питання.

Окреслені в [13] ринкові акценти в обґрунтуванні механізму управління ТВ отримали розвиток в дослідженнях останнього п'ятиріччя при розробці методологічних основ формування МТВ, що інтерпретуються як інститут мережевих партнерських відносин [2].

Ключова ідея останньої роботи полягає в обґрунтуванні можливості використання концепції маркетингу партнерських відносин [14] під назвою маркетингу взаємодії в якості методологічної бази для розробки механізму управління МТВ. Така ініціатива аргументується в [2] назрілою необхідністю переходу суб'єктів МТВ до парадигми створення спільної цінності на основі встановлення і підтримання довгострокових ділових зв'язків між усіма учасниками доставки вантажів за схемою «від дверей до дверей».

При спільному розгляді охарактеризованих в [9; 10; 12; 13] концепцій управління транспортними вузлами стає очевидним, що ні в одній з них проблемі забезпечення узгоджених дій суб'єктів ТВ серйозної уваги не приділяється, внаслідок чого виникає об'єктивна необхідність в пошуку можливостей для ліквідації цієї свого роду «білої плями» в комплексній теорії управління транспортом.

### **Методологія забезпечення узгодженого управління процесом перевалки вантажів в транспортних вузлах.**

**Вихідні положення.** Для досягнення поставленої таким чином мети дослідження необхідно враховувати, що будь-які суміжні підприємства, в тому числі транспортні, виявляються в своїй роботі тісно пов'язаними і взаємозалежними. Внаслідок цього виникає складне переплетіння ділових інтересів пов'язаних підприємств, що об'єктивно зумовлює необхідність підтримки досить ефективних контактів між підприємствами транспортних вузлів при організації і здійсненні ППВ.

Діяльність по забезпеченню такого роду контактів, починаючи з 1930-х років, іменується на транспорті по різному: то координацією, то взаємодією, то тим і іншим як єдиним цілим і зв'язується з управлінням. При цьому обидва поняття в одному випадку ототожнюються, а в іншому – розмежовуються, визначаються в широкому і вузькому сенсі (по транспортному процесу в цілому і по його окремих стадіях), трактуються в прив'язці до совокупності кожного виду транспорту (галузева постанова) і суміжних видів транспорту, включаючи транспортні вузли (міжгалузева постанова).

Існування такого роду невизначеності, йде від синонімічної надмірності у визначенні обговорюваних понять, що пояснюється перш за все неоднозначністю їх трактування в теоретико-методологічному сенсі. В результаті лінгвістичні рамки тлумачення обох понять розмиваються, що природно породжує непродуктивні дискусії і може призводити до некоректних наукових висновків.

Змальоване *status quo* у визначенні понять координації і взаємодії як інструментів досягнення узгодженості в управлінні транспортом зберігається по суті своїй до теперішнього часу. При цьому питання методичних основ координації і взаємодії як складових елементів проблеми побудови механізму управління ТВ як і раніше залишається поза увагою дослідників комплексних транспортних проблем.

Виходячи з вищевикладеного, в цій статті робиться спроба заповнити цю прогалину і підійти до вирішення проблеми забезпечення узгодженого управління ТВ з позицій, що поєднують ідеї традиційних і нових теорій забезпечення ефективного функціонування суб'єктів ринкової діяльності, конкретно, – маркетингу партнерських відносин [14], соціального партнерства [15] і лінійного програмування. При такому підході виникає необхідність в розбивці (декомпозиції) досліджуваної проблеми на дві взаємопов'язані частини, перша з яких передбачає узгодження параметрів ППВ, а друга – економіко-математичне моделювання цього процесу.

**Узгодження параметрів процесу перевалки вантажів.** Ця частина проблеми забезпечення узгодженого управління ТВ найбільшою мірою відповідає змісту початкового етапу обґрунтування параметрів єдиного технологічного процесу роботи транспортного вузла (ЄТПРТВ), перш за все таких, як кількість і розміщення виробничих зон для вико-

нання операцій з залізничним рухомим складом, спеціалізація і ресурсозабезпеченість цих зон, режими подачі та прибирання вагонів, нормативні терміни обробки вагонів по виробничим зонам і т.п.

Як показано в згадуваних вище теоріях [14; 15], необхідною і достатньою умовою досягнення узгодженості в спільних діях будь-яких індивідуумів є наявність у них зацікавленості в кінцевих результатах спільної діяльності, яка виникає завдяки встановленню згоди між партнерами. У загальному випадку згода між двома і більше суб'єктами виробляється за наступною універсальною схемою, представленою нижче на рис. 1.

У забезпеченні ефективної реалізації наведеної схеми конструювання згоди між взаємодіючими суб'єктами всі етапи грають важливу роль. При цьому на загальний результат взаємодії суб'єктів чи не вирішальною мірою впливають етапи дискусії і діалогу, від змістовного наповнення яких в кінцевому рахунку залежить, бути чи не бути згодою. Очевидно, що дискусія може призводити до позитивних результатів лише в одному випадку, а саме, коли вона буде ґрунтуватися на толерантності суб'єктів і їх дійсною зацікавленістю в досягненні взаємоприйнятних підсумків спільної діяльності, що з'ясується в ході діалогу.

Існують різні тлумачення поняття діалогу і пояснення його феноменальної суті. Так, в теорії соціального управління наголошується, що в стані діалогу створюється якась емоційна «подія», що веде до психологічної єдності суб'єктів, в якому «...розгортається творчий процес взаєморозкриття і взаєморозвитку, створюються умови для самовоздії і саморозвитку» [15]. Одночасно підкреслюється, що повноцінний діалог можливий при неодмінному дотриманні наступних умов: відсутності у контрагентів упередженості один до одного, їх рівноправності і готовності до певних самообмежень, наявності взаємної довіри і взаєморозуміння.

У разі позитивного завершення діалогу у його учасників затверджується готовність до визнання права кожного з них на прагнення домогтися власної вигоди і одночасно міцніє готовність йти на взаємні поступки заради прийняття спільно вироблених ділових рішень. В результаті стає реальною можливість переходу до етапу пошуку компромісу та консенсусу.

Розглянемо відповідну процедуру на прикладі досягнення компромісу між основними суб'єктами ТВ – портами і припортовими залізничними станціями – при визначенні одного з різновидів параметрів ЄТПРТВ, а саме – тимчасових нормативів на обробку вагонів в порту. При цьому будемо враховувати, що, вирішуючи це завдання, порти і станції будуть виступати в якості конкурентів, суперництво яких розгортається навколо показника нормативної тривалості обробки подач вагонів на вантажних фронтах порту.

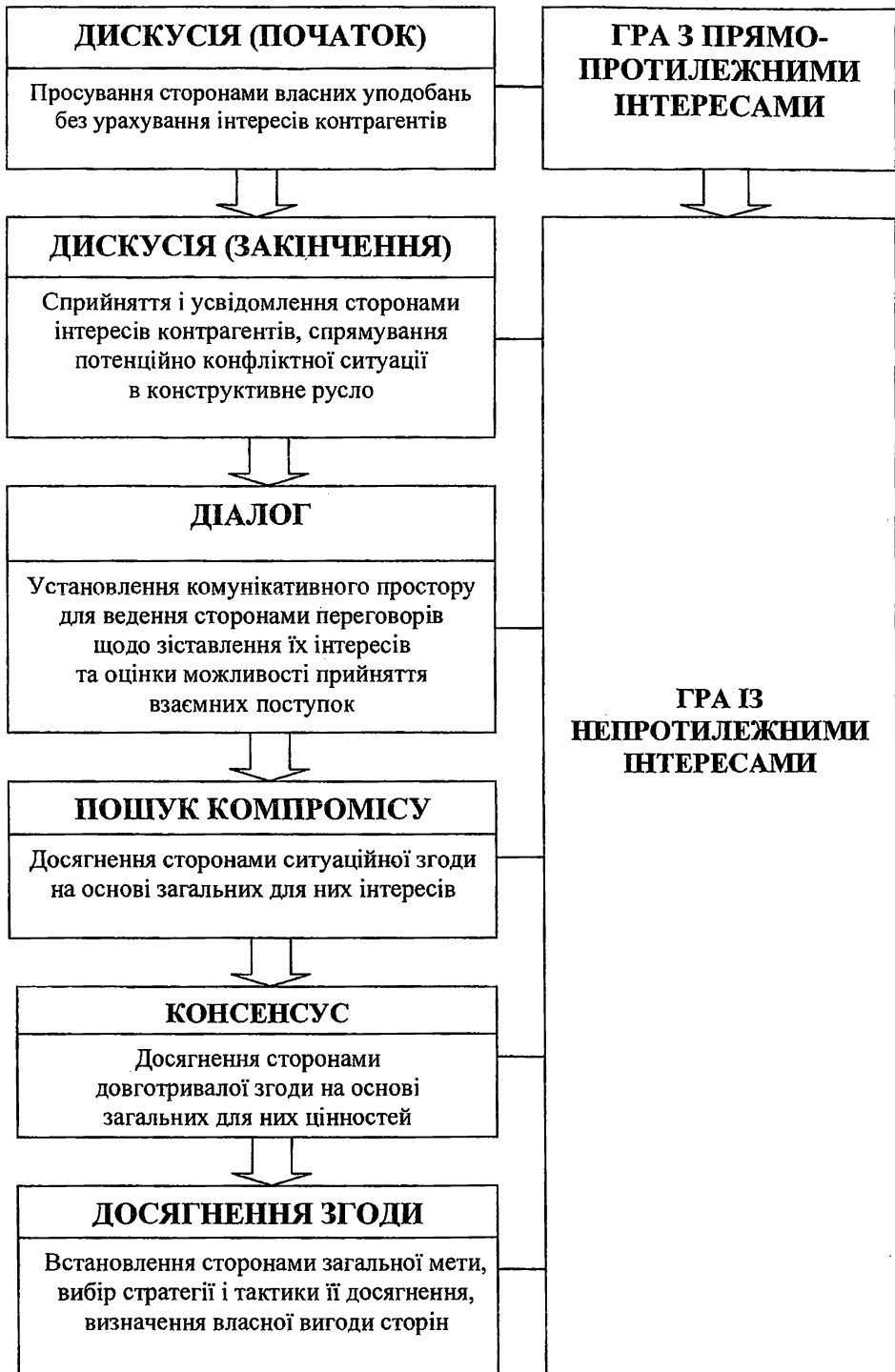


Рис. 1. Схема досягнення згоди між взаємодіючими суб'єктами

Видається очевидним, що зменшення цього часу однозначно вигідно станції, так як в результаті цього забезпечується скорочення загального часу перебування вагонів в ТВ і за рахунок цього зростання їх правоздатності, що вигідно фірмі-власнику вагонного парку. А це обертається для станції можливістю підвищення тарифів на обробку вагонів. У той же час для портів такий підхід пов'язаний з необхідністю посилення механоозброєності вантажних фронтів, що вимагає відповідного фінансування і в силу цього логічного збільшення тарифів на обробку вагонів. А така перспектива для портів небажана, тому що вона може привести до втрати вагонопотоків.

З наведених пояснень випливає, що тимчасові нормативи ЄТПРТВ повинні мати компромісний характер, тобто встановлюватися шляхом вирішення конфліктної по суті ситуації, в якій спостерігається зіткнення ділових інтересів портів і станцій.

Як відомо, для дослідження такого роду конфліктних ситуацій зазвичай застосовують методологічний арсенал теорії ігор. При такому підході в окремо розглянутому ТВ порт і слід трактувати як гравців, варіанти їх ділової поведінки – як стратегії, спільно обрані стратегії (загальні рішення) – як результати гри, а вигоду, що досягається гравцями – як виграш кожного з них.

Позначимо через  $D$  і  $G$  безлічі стратегій відповідно до порту і станції. Нехай вони вибирають стратегії  $x \in D$  і  $z \in G$ , що призводить до результату гри  $(x, z)$ . При цьому досягаються виграші порту  $f(x, z)$  і станції  $g(x, z)$ , які залежать для кожного гравця від вибору як власної стратегії, так і від стратегії, обраної контрагентом. Завдання кожного гравця полягає, очевидно, в тому, щоб за рахунок обраної стратегії максимізувати свою функцію виграшу відповідно –  $f(x, z)$  и  $g(x, z)$ .

Відзначимо, що, приступаючи до встановлення компромісних рівнів нормативів ЄТПРТВ (тобто напередодні етапу дискусії), порт і станція виступають в якості гравців з протилежними інтересами і можуть утримуватися від взаємного інформування. За такої умови між ними можливий розвиток антагоністичної гри, в якій гравці повинні виробляти свої вибори одночасно, не знаючи про вибір один одного. Тому і порт, і станція повинні обирати стратегії, розраховані на найгіршу для них поведінку контрагентів, тобто керуватися принципом гарантованого результату в вигляді максимінного виграшу для них, тобто

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \max_D \min_G F_1(x, z); \\ F_2 &= \max_G \min_D F_2(x, z) \end{aligned} \right\} . \quad (1)$$

У той же час по завершенні етапів дискусії і діалогу, коли стає можливим пошук компромісу, конкурентне протистояння між взаємодіючими суб'єктами практично повністю втрачає конфліктну гостроту, хоча у кожного суб'єкта як і раніше зберігається прагнення максимізувати власну вигоду, але вже без нанесення шкоди контрагенту (контрагентам). За такої умови взаємини між конкуруючими суб'єктами набувають характеру співробітництва, що дозволяє трактувати їх в формальному плані як кооперативну гру в формі арбітражного рішення або завдання торгу по Дж. Нешу [16].

При пошуку арбітражного рішення досліджується безліч можливих результатів гри

$$\bar{S} = \{(x, z) : x \in D, Z \in G\}, \quad (2)$$

з кожним з яких зв'язуються виграші порту і станції.

Далі за результатами попередньої домовленості між партнерами по ТВ фіксується безліч допустимих результатів  $S \in \bar{S}$ , причому безліч  $S \in \bar{S}$  в двовимірному просторі виграшів гравців має вигляд

$$W = \{(u, v) : u = f(x, z), v = g(x, z), (x, z) \in S\}, \quad (3)$$

і носить назву безлічі допустимих арбітражних рішень.

В принципі і порт, і станція не зобов'язані погоджуватися з арбітражним рішенням, і тоді вони можуть задовольнятися рішеннями  $\bar{u}$  (для порту)  $\bar{v}$  (для станції), які забезпечуються кожним суб'єктом самостійно. Відповідність цього рішення точку  $(\bar{u}, \bar{v})$  називають точкою status quo або точкою розладу. Відзначимо, що в якості  $(\bar{u}, \bar{v})$  можна приймати, наприклад, гарантовані виграші гравців, які визначаються за формулами (1).

Тройка  $(W, \bar{u}, \bar{v})$  – є арбітражним завданням, для якої існує арбітражне рішення  $(u^*, v^*)$ , де  $u^*, v^*$  – виграші першого і другого гравця відповідно. При цьому відображення  $A$ , яке кожне арбітражне завдання  $(W, \bar{u}, \bar{v})$  ставить у відповідність арбітражному рішенням  $(u^*, v^*) = A(W, \bar{u}, \bar{v})$  визначається як арбітаржна схема.

Арбітражне рішення для випадку двох гравців, що відповідає умовам нашого прикладу, вперше визначив Дж. Неш і обґрунтував коректність його досягнення при справедливості системи певних аксіом (або припущень в термінології [16]).

У теоремі Дж. Неша стверджується, що якщо безліч  $W$  опукло, замкнуто, обмежено і має внутрішні точки, то існує єдине арбітражне відображення  $A$ , що задовольняє згаданій аксіомі. При цьому визначається умовою рішення

$$\left( \bar{u}^* - \bar{u} \right) \left( \bar{v}^* - \bar{v} \right) = \max_{(u, v) \in W} (u - \bar{u}) (v - \bar{v}) \quad (4)$$

та іменується арбітражним рішенням Дж. Неша.

Таким чином, завдання відшукування арбітражного рішення Дж. Неша складається з максимізації функції  $F(u, v) = (u - \bar{u})(v - \bar{v})$  на безлічі  $W$ .

**Моделювання процесу перевалки вантажів.** Видається очевидним, що завдання з відшукування компромісних рівнів часових нормативів ЄТПРТВ формально повністю задовольняє умовам теореми Дж. Неша, в силу чого використання при її дослідженні процедури пошуку арбітражного рішення є правомірним.

Будемо розглядати обговорювану задачу в такій постановці. Припустимо, що протягом деякого інтервалу часу, розбитого на  $r$  ( $k = \overline{1, r}$ ) відрізків (наприклад, часів), необхідно реалізувати ППВ шляхом переміщення в межах ТВ певних обсягів вантажопотоків (наприклад, відповідних завантаженню залізничних вагонів або магістральних автомобілів, або судових партій) по заздалегідь прийнятим організаційно-технологічним варіантам (ОВ) з проходженням через конкретну фіксацію виробничих зон.

При цьому в якості виробничих будемо розглядати зони, обладнані на припортовій залізничній станції (шлях – головний, приймально-відправний, відстійний і сполучений з портом), в порту (виставкові залізничні колії, вантажні фронти – кордонні, тилові, складські) і поблизу порту (транзитно-вантажні термінали для обслуговування магістральних авто-мобілів). Домовимося, крім того, вважати, що виробничі зони характеризуються пропускнуною спроможністю і допустимим часом використання в межах інтервалу управління, а їх кількість може при необхідності збільшуватися за рахунок переведення контингенту робітників з інших об'єктів, що обслуговуються підприємствами ТВ.

Будемо також вважати, що ефективність реалізації ППВ оцінюється за ступенем забезпечення норм часу перебування в ТВ вантажів і транспортних засобів, що відповідає інтересам клієнтури і тим самим сприяє підвищенню в їхньому уявленні привабливості (так само конкурентоспроможності) ТВ. А ця обставина однаково вигідна всім суб'єктам ТВ, в силу чого вона може служити для них спільною метою і, отже, гарантією згоди.

Перейдемо до формалізації обговорюваної задачі і введемо необхідні позначення, а саме:

Відомі величини (задані константи):

$i$  – індекс виробничих зон для обслуговування вантажопотоків ( $i = \overline{1, m}$ );

$j$  – індекс обслуговуваних вантажопотоків ( $j = \overline{1, m}$ );

$k$  – індекс відрізків часу розглянутого інтервалу управління ( $k = \overline{1, r}$ );

$T_{jk}$  – резерв робочого часу  $i$ -ї зони на протязі  $k$ -го відрізка часу;

$a_{ijk}$  – питома ресурсомісткість (трудомісткість) обслуговування  $j$ -го вантажопотоку в  $i$ -й зоні на протязі  $k$ -го відрізка часу;

$\underline{x}_{ijk}$  та  $\overline{x}_{ijk}$  – відповідно мінімальний і максимальний об'єми  $j$ -го вантажопотоку, які необхідно обслужити в  $i$ -й зоні на протязі  $k$ -го відрізка часу;

$\underline{t}_{ijk}$  та  $\overline{t}_{ijk}$  – відповідно мінімально і максимально допустимий час використання  $i$ -ї зони для обслуговування  $j$ -го вантажопотоку на протязі  $k$ -го відрізка часу;

$f_{ijk}$  – питомий дохід обслуговування  $j$ -го вантажопотоку в  $i$ -й зоні на протязі  $k$ -го відрізка часу;

$c_{ik}$  – питоми витрати на утримання  $i$ -ї зони на протязі  $k$ -го відрізка часу.

Невідомі величини (керовані змінні):

$x_{ijk}$  – плановий обсяг обслуговування  $j$ -го вантажопотоку в  $i$ -й зоні на протязі  $k$ -го відрізка часу;

$t_{ijk}$  – плановий час використання  $i$ -ї зони для обслуговування  $j$ -го вантажопотоку на протязі  $k$ -го відрізка часу.

У наведених позначеннях шукана модель задачі оптимізації ППВ має вигляд

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ijk} x_{ijk} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r c_{ik} t_{ijk} \rightarrow \max; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r a_{ijk} x_{ijk} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{ijk} = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ijk} \leq T_{ik}, \quad i = \overline{1, m}; \quad k = \overline{1, r}; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{x}_{ijk} &\leq x_{ijk} \leq \overline{x}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, r}; \\ \underline{t}_{ijk} &\leq t_{ijk} \leq \overline{t}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, r}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$



Умови наведеної моделі мають такий змістовний сенс:

- забезпечення оптимального варіанта реалізації ППВ в сенсі дотримання нормативних термінів обслуговування вантажів і транспортних засобів (5);
- обмеження на використання резерву робочого часу  $i$ -ї зони протягом інтервалу планування (6);
- обмеження щодо забезпечення сумарного часу використання основних і додаткових виробничих зон в межах резерву робочого часу на протязі відрізків часу для здійснення ППВ (6);
- відповідність обсягів перевалки вантажів і параметрів виробничих зон заданим межам їх зміни (6)-(8).

Відзначимо, що оптимальність рішення задачі (5)-(8) забезпечується завдяки введенню в цільову функцію (5) оцінок в якості змінних коефіцієнтів при невідомих.

**Висновки.** Підводячи підсумки розгляду охарактеризованих у даній статті результатів дослідження проблеми забезпечення узгодженого управління ППВ в ТВ, можна зробити висновок, що мета і завдання наступного етапу її опрацювання природним чином пов'язуються з методичним оформленням пропонованого механізму реалізації описаної вище схеми досягнення згоди взаємодіючих в ТВ виробничих підприємств і сервісних структур з подальшою оптимізацією ППВ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Diell H. *Losungsansatz zur mathematischen Modellierung der Kapazitätsbilanzierung für diskontinuierliche Umschlagprozess* [Text] / H. Diell // *Hebezeuge und Förderm.* – 1987. – V. 27. – № 2. – P. 44-45.
2. Ботнарюк М.В. *Методология формирования транспортного узла как института сетевых партнерских отношений* [Текст] / М. В. Ботнарюк // *Современная конкуренция.* – 2012. – № 3 (38). – С. 98-110.
3. Bird J.H. *Seaports and Seaport Terminals* [Text] / J.H. Bird // London: Hutchinson, 1971.
4. *The changing role of ports in Supply-chain management, an Empirical Analyses* [Carbone V and De Martino M] [Text] // *Maritime Policy and management.* – 2003. – V. 30. – № 4. – 405 p.
5. Ritchey T. (1997) *Scenario Development and Risk Management using Morphological Field Analysis: Proceedings of the 5-th European Conference on Information Systems.* – Cork: Cork Publishing Company, 1997. – Vol. 3. – 1053-1059.
6. Zwicky F. (1969) *Discovery, Invention, Research - Through the Morphological Approach.* – Toronto: The Macmillan Company, 1969.

7. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. *The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents* // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – Part B. – Vol. 26. – № 1. – 1996. – P. 1-13.*
8. Krishnaiyer K., Cheragh S.H. *Ant Algorithms: review and Future Applications: IERC'02, Industrial Engineering Research Conference. – Orlando, USA, may 2002.*
9. Куренков, П.В. *Управление доставкой внешнеторговых грузов в смешанном сообщении [Текст]: Дис. ... д-ра экон. наук / П.В.Куренков. – М.: ГУУ, 1999. – 478 с.*
10. Хоар Н. *Взаимодействующие последовательные процессы [Текст] / Н. Хоар: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 264 с.*
11. Milner R.A. *Calculus of Communicating Systems, Lecture Notes in Computer Science 92. – New York: Springer-Verlag, 1980.*
12. Клепиков В.П. *Методология комплексного развития транспортных систем в проектах взаимодействия железнодорожного и морского транспорта [Текст]: Дис. ... д-ра техн. наук / В.П. Клепиков. – М.: МГУПС (МИИТ), 2007. – 352 с.*
13. Сычев А.А. *Организация работы транспортного узла в составе транспортного коридора [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / А.А. Сычев. – Ростов н/Д: РГУПС, 2009. – 167 с.*
14. Гордон Ян Х. *Маркетинг партнерских отношений [Текст] / Ян Х. Гордон: Пер. с англ. – СПб.: Питер, 2001. – 379 с.*
15. Андреев С.С. *Теория социального управления: субъект и объект социального управления [Текст] / С.С. Андреев // Социально-гуманитарные знания. – 2001. – № 1. – С. 80-96.*
16. Льюс Р. *Игры и решения [Текст] / Р. Льюс, Х. Райфа. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 642 с.*

*Стаття надійшла до редакції 20.10.2017*

#### **Рецензенти:**

кандидат технічних наук, доцент, речник генерального директора стивідорної компанії ТОВ «Новотех-Термінал» **Ю.І. Овсянніков**

кандидат технічних наук, професор кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету **Д.М. Решетков**

UDC 65.012.123

Varvara Piterska

## MECHANISMS FOR THE VALUE MANAGEMENT OF INNOVATIVE PROJECTS

*There are determined the value management model of a knowledge-based organization, the resource value of a knowledge-based organization, its internal and external energy in the article. The main position in the structure of modern science is the definition of energy – a single measure of various forms of movement and synergy of substance. The proposed model is aimed at forming of portfolio or program that are effective for achieving of the strategic goals of a project-oriented organization. The definition of dominant values allows forming of a value-oriented development portfolio, that allows movement of the project organization to a new level of competitiveness. The value-based project's approach is best suited to the challenges of the global economy and global competition. Using of the value approach in management of the project-oriented organization allows solving of a complex of tasks for calculating of project value for all stakeholders, forming of an effective portfolio of organization's projects, assessing of the effectiveness of various types of organization resources, assessing of the achievability of strategic goals without attracting external sources of value.*

**Keywords:** *project management, project-oriented organization, value, innovation.*

*У статті визначено коефіцієнт цінності ресурсів наукомісткої організації на основі запропонованої моделі управління цінністю проектно-орієнтованої організації, а також її внутрішня і зовнішня енергія. Запропонована модель спрямована на формування портфеля або програми проектів, ефективних для досягнення стратегічних цілей проектно-орієнтованої організації.*

**Ключові слова:** *управління проектами, проектно-орієнтована організація, цінність, інновація.*

*В статье определен коэффициент ценности ресурсов наукоёмкой организации на основе предложенной модели управления ценностью проектно-ориентированной организации, а также ее внутренняя и внешняя энергия. Предлагаемая модель направлена на формирование портфеля или программы проектов, эффективных для достижения стратегических целей проектно-ориентированной организации.*

**Ключевые слова:** *управление проектами, ценность, проектно-ориентированная организация, инновация.*

© Piterska Varvara, 2017

**Introduction.** The use of methods for assessing of the effectiveness of project-oriented organizations can improve the quality of management decisions at all levels of enterprise management from individual projects to corporate governance and allocation of investments.

As a methodological basis for the management of such organizations, a value approach is appeared, the conceptual model of which is presented in [1].

The model proposed in the work is aimed at forming of portfolio or program of projects that are effective for achieving of the strategic goals of a project-oriented organization.

Despite the close attention paid by specialists to solving this problem, the effectiveness of practical implementation of individual projects, portfolios and programs remains at a very low level.

Even more objective and reliable estimates are important in the implementation of state targeted programs and priority national projects involving companies carrying out productive activities through the implementation of a number of separate projects [2].

**Analysis of the main achievements and literature.** The theory of strategic management considers the development of any organization as a process of purposeful movement towards the formulated strategic goals [3].

The use of natural-science models in the description of project management processes was reflected in works [4; 5; 6].

The most noticeable features of a project-oriented organization are manifested in the following areas:

- in the system of personnel requirements, which must have a unique set of skills, and in a system of motivation that must meet these requirements;
- in the organizational structure of the organization, which implies the possibility of free manipulation of human resources in projects, regardless of their assignment to certain functional units;
- in the structure of the budget of the organization, based on the budgets of individual projects;
- in the organization of business processes, based on the availability of stringent requirements for deadlines and project budgets, as well as the quality of the result.

The success of a project-based organization largely depends on how well the resources are used.

It is planned to form temporary teams on the basis of permanent functional divisions of the organization, created for specific projects.

When using such structures, both the allocation of resources and the management procedures become more complicated [7].

Depending on the scale of the organization and the characteristics of the project portfolio, the following components can be developed:

- regulations for the formation and monitoring of portfolio sales;

- methods for individual areas of portfolio management (methodology – for ranking projects, methodology for selecting projects in the portfolio and others);

- templates of working documents on portfolio management.

Based on the hypotheses examined, it is proposed in [8] to study the regularities of the organization's movement in the space formed by the strategic goals of the organization, using field physics methods, proceeding from the fact that projects implemented by the organization are often considered as driving forces [9].

Development of the value management model of the project-oriented organization, which will allow to solve the task of forming an effective portfolio of the organization's projects in terms of achieving strategic goals, is the purpose of the study.

**Materials of research.** The basic position in the structure of modern natural science is the definition of energy as a single measure of various forms of motion and interaction of matter [10]. Matter exists in nature in the form of substance and field.

Consequently, it can be concluded that the organization functions as a substance moving and interacting with other organizations in the field of the market environment.

The materialist conception suggests that matter is everything that the surrounding world consists of, a multitude of phenomena, objects and their systems, the bearer of all the various properties, relations, interactions of objects and forms of motion [11].

Important stages in the successful achievement of the project objectives are the identification of the composition of the project participants, the definition of their role and interaction order, the formation of a project management team, and the construction of an organizational structure.

Let's formulate on the basis of the analogy method several key approaches that will form the theoretical basis of the value model of management of a project-oriented organization.

The total value of an organization, as a system, can be considered as a sum of its internal and external values.

The internal value of an organization depends only on its state:

- fixed assets;
- working capital;
- intangible assets;
- the level of staff qualifications;
- perfection of the management system used.

Thus, in projects there are two interconnected resource groups:

- material and technical (raw materials, materials, structures, components, energy, technological resources, installed equipment);
- labor (carry out the direct work with material and technical resources).

The internal value of the organization in the transition from one state to another will be equal to the difference between its values in the final and initial states, regardless of the trajectory on which the transition was made.

That is, the internal value includes the value of all types of resources of the organization and is a function of its state.

The external value of the organization characterizes the processes of its interaction with other organizations and the environment.

The external value consists of two components:

- kinetic (determined by the speed of the organization by changing the parameters of the organization's strategic goals in time);

- potential component (the distance between the current state of the organization and the desired in the space of the «target» coordinates).

During the implementation of a project, the organization either increases its internal value, or moves in the direction of the «desired» position in the space of strategic objectives.

Based on these hypotheses, you can define the project as a focused process of creating or transforming values for all stakeholders.

The law of conservation of values assumes that, in the absence of external influences, the value of an isolated system remains constant, only the process of converting one type of value into another takes place in the organization.

The value model can be used to solve a number of problems of managing project-oriented organizations, for example, using the law of conservation of value, one can calculate the theoretical possibility of achieving strategic goals without using external borrowing.

A similar method can solve the problem of determining the necessary amount of investment to implement the company's strategy.

The task of the portfolio management is critical for the organization, because ensures the linking of projects with the strategy and the adoption of the most effective and necessary for the organization of projects.

The main goal of the project portfolio creation phase is the formation of a system of projects that can potentially be initiated and accepted for implementation. At this phase, the project (investment) initiatives and applications are collected without taking into account the financial and other limitations of the organization.

One of the main tasks of portfolio management of an organization is the task of forming an effective portfolio of projects.

Methods for analyzing the project portfolio are based, on the one hand, on careful risk analysis and, on the other hand, on determining the most effective criteria that can act as a measure of project and portfolio returns.

We will solve the problem of forming an effective portfolio of projects based on the proposed value model.

Let the organization have a potential implementation opportunity  $P$  of various projects and  $n$  types of resources in quantity of  $Q_i$ .

In this case, each project  $A_p$  requires for its implementation  $w_{pi}$  resources of  $i$ -kind and is evaluated for  $g$  strategic purposes.

In this case, the resources of each type required for the implementation of the project portfolio are determined by summing up the resource amounts of this type for all projects included in the portfolio.

The development and selection of the strategy are carried out at three different levels:

- functional (strategy is developed for each functional unit in order to specify the chosen project strategy);
- corporate (general direction of development, strategy of growth, conservation or reduction);
- business (competition of goods in a particular market).

The choice of the strategy for the development of the project-oriented organization should be carried out within the framework of the general direction of activity already chosen:

- leadership in costs – high level of technological processes;
- strategy of differentiation – uniqueness in any direction;
- concentration on certain areas – a group of customers, a product range.

It should be noted that if we reject this assumption, in general, to solve the problem of portfolio formation, it is necessary to compare all possible portfolios.

Thus, the system of restrictions of the domain of admissible solutions can be written as

$$\sum_{i=1}^T W_{pi} \leq Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

The task of forming an effective portfolio can be formulated in this way: either, if the function of aggregating estimates is given, find the best portfolio from the point of view of the value of the aggregation function; either find all the Pareto-optimal portfolios that satisfy the– resource constraint and provide the decision maker with a choice from this set.

As an objective function of portfolio optimization, it is possible to take the degree of organization's achievement of its strategic goals, that is, to minimize the distance between the point characterizing the state of the organization after the implementation of this portfolio and the point corresponding to the desired state of the organization [12].

Let  $j = 1, 2, \dots, m$  – multiple objectives of the organization,  $R_j^2$  and  $R_j^0$  – the values of the target parameters of the organization in its desired state and as a result of the implementation of the adopted portfolio of projects, respectively [13].

The formation of an effective portfolio of projects occurs in accordance with the model

$$L = \sqrt{\sum_{j=1}^m [(R_j^2 - R_j^0)^2]} \longrightarrow \min. \quad (2)$$

With the help of the developed model, it is also possible to rank various types of organization resources by their value.

To obtain numerical solutions, the linear programming method is used.

Suppose that at the initial time  $t_1$  the value of the first type of resource was  $E_j^\alpha$ , and at the time  $t_2$  the value was  $E_j^\beta$ . The difference between  $E_j^\alpha$  and  $E_j^\beta$  is explained by the physical wear and tear of this type of resource of the project-oriented organization.

From the external environment or internal reserves of the enterprise, by carrying out maintenance or modernization work during this period of time, additional value was added to this resource  $\Delta E_j$ .

Since over time  $\Delta t = t_2 - t_1$  the  $i$ - resource participated in the implementation of a number of projects, the total value of the organization has changed by the amount of  $\Delta V$  [14]. It is possible to calculate the so-called coefficient of value – a parameter that characterizes the effectiveness of a given type of resource for the evaluated organization

$$g_j = \sum_{j=1}^m \frac{E_j^\beta - \Delta E_j + \Delta E}{E_j^\alpha}. \quad (3)$$

It should be noted that the physical meaning of the resource efficiency coefficient is analogous to its dual estimation in the case of solving the linear programming problem. It is important to emphasize that if the coefficient of value  $g_j < 1$ , then this resource is inefficient for the organization.

**Conclusions.** The project's approach, best suited to the challenges of the global economy and global competition, is a value-based approach. The definition of dominant values allows to form a value-oriented development portfolio, through which the project organization can move to a new level of competitiveness. The use of the value approach in the management of development by a project-oriented organization allows to solve a whole complex of tasks in formation of an effective portfolio of the organization's projects in terms of achieving strategic goals, assessing the effectiveness of various types of resources of the organization, assessing the achievability of strategic goals without attracting external sources of value (loans, investments), calculation of project value for all stakeholders.



## REFERENCES

1. *Bushuyev S.D. Tsennostnyy podkhod v deyatel'nosti proyektno-upravlyayemykh organizatsiyakh // Naukoviy visnik Mizhnarodnogo gumanitarnogo universitetu: Zb. nauk. prats'. – Vip. 1. – Odessa: MGU, 2010 – P.12-20.*
2. *Vaysman V.O. Modeli, metodi ta mekhanizmi stvorenniya i funktsionuvannya proyektno-kerovanoi organizatsii: Avtoreferat disertatsii na zdobuttya naukovoogo stupenya doktora tekhnichnikh nauk za spetsial'nisty 05.13.22 – upravlinnya proyektami ta programami. – Odesa: Odes'kiy natsional'niy mors'kiy universitet, 2010. – P. 4-6.*
3. *Ansoff I. Strategicheskii menedzhment. Klassicheskoye izdaniye: Uchebn. posobiye. – SPb.: Piter, 2011. – 344 p.*
4. *Bondar' A.V. Upravleniye tsennost'yu lizingovogo proyekta // Visnik ONMU: Zb. nauk. prats'. – Vip. 33. – Odessa: ONMU, 2011. – P. 144-160.*
5. *Teslenko P.A. Projekt kak upravlyayemaya organizatsionno-tekhnicheskaya sistema // Visnik NTU KHPi: Zb. nauk. prats'. – Vip. 6 (57). – Kharkiv: NTU, 2010. – P. 198-202.*
6. *Druzhinin E.A. Metodologichni osnovi rizik-oriyentovanogo pidkhodu do upravlinnya resursami proyektiv i program rozvitku tekhniki: Avtoreferat disertatsii na zdobuttya naukovoogo stupenya doktora tekhnichnikh nauk za spetsial'nisty 05.13.22 – upravlinnya proyektami ta programami. Natsional'niy ayerokosmichniy universitet im. M.E. Zhukovs'kogo. – Kharkiv: Kharkivs'kiy aviatsiyniy institut, 2006. – 34 p.*
7. *Bruking E. Intellektual'nyy kapital. – SPb.: Piter, 2001. – 243 p.*
8. *Shakhov A.V. Modelirovaniye dvizheniya organizatsii v proyektnoy srede // Upravlinnya rozvitkom skladnikh sistem: Zb. nauk. prats'. – Vip. 7. – K.: KNUBA, 2011. – P. 68-72.*
9. *Bushuyev S.D., Yaroshenko F.A. Upravleniye innovatsionnymi proyektami i programmami na osnove sistemy znaniy R2M: Monografiya. – K.: Sammit-Kniga, 2011. – 268 p.*
10. *Guseykanov M.K. Kontseptsii sovremennogo yestestvoznaniya: Uchebnik. – M.: Dashkov i K°, 2007. – 540 p.*
11. *Kuchevskiy V.B. Analiz kategorii materiya. – M.: Nauka, 1983. – 255 p.*
12. *Piterskaya V.M., Bokareva M.O. Energeticheskaya model' upravleniya tsennost'yu proyektno-oriyentirovannoy organizatsii // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – Vyp. 1/10 (61). – Ch.3. – Khar'kov: Tekhnologicheskiiy tsentr, 2013. – P. 199-203.*

13. Píters'ka V.M. Zastosuvánnnya proyektno-oriêntovanogo pídkhodu v upravlinní innovatsíynoyu díyal'nisty // *Vísnik Natsíonal'nogo tekhníchnogo uníversitetu «KHPÍ»: Zbírnik naukovikh prats'.* Seríya: *Strategíchné upravlinnya, upravlinnya portfelyami, programami ta proyektami.* – Khar'kov: NTU «KHPÍ», 2016. – № 1 (1173). – P. 35-42.
14. Píterska Várvara. *Methodological basis of innovative project-oriented organizations' management // Upravlinnya rozvitkom skladnikh sistem: Zbírnik naukovikh prats'.* – K.: KNUBA, 2017. – № 30. – P. 11-20.

*Стаття надійшла до редакції 20.12.2017*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, проректор з навчально-організаційної роботи Одеського національного морського університету  
**А.В. Шахов**

кандидат технічних наук, доцент, директор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»  
**В.І. Чимшир**

УДК 005.8: 004.02

Т.Г. Григорян, С.Д. Титов, Л.С. Чернова

**БАЛАНСУВАННЯ ЦІННОСТЕЙ СТЕЙКХОЛДЕРІВ ПРОЕКТУ  
НА ОСНОВІ ТЕОРЕТИКО-ІГРОВОГО ПІДХОДУ**

*Розглянуто проблему балансування цінностей стейкхолдерів проекту як розв'язання некоаліційної гри між двома гравцями. Наведено концепцію методу балансування цінностей стейкхолдерів та загальні ціннісні засади, які становлять основу стратегій менеджера та команди проекту, а також стейкхолдерів як гравців. Подано математичні моделі які дозволяють отримати рекомендації щодо використання чистих та мішаних стратегій максимізації цінностей гравців на основі моделей ігор з нульовою сумою та біматричних ігор. Надані метод та моделі дозволяють забезпечити сталість виконання проекту та його завершення. Подальші дослідження необхідно спрямувати на удосконалення моделей та засобів ідентифікації цінності для складання платіжних матриць гравців.*

**Ключові слова:** управління проектом, цінність, цінності стейкхолдерів, балансування цінностей, матричні ігри, антагоністичні ігри, біматричні ігри.

*Рассмотрена проблема балансировки ценностей стейкхолдеров проекта как решение бескоалиционной игры между двумя игроками. Представлена концепция метода балансировки ценностей стейкхолдеров и общие ценностные принципы, которые формируют основу стратегий менеджера и команды проекта, а также стейкхолдеров как игроков. Разработаны математические модели, позволяющие получить рекомендации по использованию чистых и смешанных стратегий максимизации ценностей игроков на основе моделей игр с нулевой суммой и биматричных игр. Представленные метод и модели позволяют обеспечить стабильность выполнения проекта и его завершения. Дальнейшие исследования необходимо направить на совершенствование моделей и средств идентификации ценности для формирования платежных матриц игроков.*

**Ключевые слова:** управление проектом, ценность, ценности стейкхолдеров, балансировка ценностей, матричные игры, антагонистические игры, биматричные игры.

*The problem of balancing project stakeholders' values as a solution of a non-cooperative game between two players is considered. The concept of the method of balancing stakeholders' values and common value principles that form the basis of the strategies of project manager, as well as of project stakeholders as players, is presented.*

*The mathematical models, which allow to receive recommendations on the use of pure and mixed strategies for maximizing the players' values based on models of zero-sum and bimatrix games are developed. The presented method and models allow to ensure the stability of the project execution and completion. Further research should be directed to improving the models and means of value identification for building players' payoff matrices.*

**Keywords:** *project management, value, stakeholders' values, value balancing, matrix games, zero-sum games, bimatrix games.*

**Вступ.** Головне завдання менеджера проекту – забезпечення виконання проекту та його завершення в межах трикутника основних обмежень з урахуванням характеристик середовища. Проте, згідно з концепцією ціннісно-орієнтованого управління яка все більш набуває популярності, головним завданням менеджеру є забезпечення створення цінності у формі корисного ефекту проекту та її міграція до стейкхолдерів [1; 2]. Ця ідея акцентується в IT-проектах, керівництво якими здійснюється згідно з Agile методологією [3; 4; 5]. Сьогодні цінність стає ключовим рушієм ініціювання проекту, його втілення та завершення. Одним з найважливіших завдань у забезпеченні створення та міграції цінності є її балансування.

Підставою вирішення проблеми балансування цінності є конфлікт інтересів системного характеру, який майже неминучий в процесі управління проектом та має місце через різні цінності стейкхолдерів та різне сприйняття ситуації навколо проекту та його корисного ефекту. Ефективність та результативність управління проекту прямо пов'язані з можливостями прогнозування таких ціннісних конфліктів, розробкою сценаріїв з мінімізації їх негативного впливу на реалізацію проекту. Вирішення проблеми ускладнюється унікальним характером проекту та підвищеною нестабільністю його оточення, що, звичайно, справляє вплив на стейкхолдерів. Перш за все, балансування має бути спрямоване на усунення цих конфліктів, спричинених розбіжністю ціннісних очікувань та сприйняття продукту стейкхолдерами. Ціллю балансування цінності стейкхолдерів є забезпечення підтримки та участі стейкхолдерів у реалізації проекту та, зрештою, сприйнятті продукту, що має ціллю створення та донесення цінності. Отже, існує потреба в моделях, які допоможуть нам прогнозувати вплив ціннісних конфліктів у проектах та розгорнути підтримку в прийнятті рішень при виборі найефективніших моделей поведінки менеджера у певних ситуаціях.

**Аналіз літератури.** Дослідженню цінності присвячений значний обсяг наукових праць. Треба зазначити, що умовно можна розрізнити дослідження цінностей концептуального та описового типу. Перший охоплює фундаментальні праці таких авторів як М. Рокіч, С. Шварц, Г. Хофштеде [6-8].

Спеціальні дослідження в галузі управління проектами присвячені вивченню цінностей другого типу. Питання управління цінностями в управлінні проектами узагальнені та системно викладені в міжнародному стандарті P2M [9]. Окрім цього, суттєва увага цінності приділена основним принципам та практичним рекомендаціям Гнучкої методології [3; 4]. Г. Керцнер та Ф. Саладіс також вказують на потребу в усуненні ціннісного конфлікту, зазначаючи, що врівноважування потреб стейкхолдерів стає особливо важким через те, що проекти набувають міжнародного характеру – треба приймати до уваги культурні, етичні, релігійні та інші фактори [1]. І це також підтверджує доцільність застосування «м'яких» методів управління у вирішенні проблеми балансування. Вони визначають 6 типів конфліктів у парних комбінаціях 4 груп стейкхолдерів та зазначають, що врівноваження, спрямоване на усунення конфліктів, це надзвичайно складне завдання. Проте, вони не надають жодних конкретних рекомендацій для його виконання.

У [2] представлена модель балансування цінності, яка дозволяє оцінювати стабільність організації та полегшує аналіз альтернатив при виборі стратегій для розвитку фінансових інститутів. Однак, ця модель використовується для балансування цінностей розвитку організацій, а не самих проектів, та, також, не бере в достатній мірі до уваги динамічний характер самих цінностей. Додатково, застосування різних підходів, спрямованих на балансування цінностей, що пропонуються та використовуються в загальному управлінні, неможливе до управління проектами через унікальність [1].

Взагалі, в управленні проектами проголошено та вирішуються дві проблеми балансування цінності [1; 10; 11]: а) гармонізація згідно зі стратегією розвитку підприємства, яка може бути зведена до упорядкування проектів (субпроектів) та надання переваги тим, що більшою мірою відповідають стратегічним цінностям організації; б) балансування між цінностями стейкхолдерів проекту, що є різновидом операції з урівноваження. Перша проблема успішно вирішується за допомогою вербальний методів аналізу рішень [12]. Цей метод разом із відповідними моделями показує гарні результати у різних прикладних галузях, включно з управлінням портфелями проектів в галузі атомної енергетики та муніципального управління, прийняття рішень в управлінні команд проектів з аутсорсингу, сфері застосування та управлінні графіком проектів Гнучкої методології, і т. ін. [13-15]. На відміну від цього, в галузі вирішення проблеми балансування цінностей стейкхолдерів рівень дослідження однозначно недостатній через складність цієї проблеми, пов'язаної з наступними особливостями: унікальність проекту, що суттєво ускладнює розробку моделей, логіка яких ґрунтується на прецедентах; нестабільність зовнішнього середовища проекту та, як результат, висока динаміка оцінок стейкхолдерів; суб'єктивний характер цінності, що ускладнює процеси її ідентифікації, систематизації та оцінки для прийняття проектних рішень; недостатній рівень розробки методологічної бази для прогнозування цін-

ності через брак досліджень, спрямованих на розробку моделей та методів управління цінністю. Інший фактор, що суттєво ускладнює вирішення проблеми балансування цінності, це присутність «м'якого» компонента завдяки потребі в роботі зі стейкхолдерами проекту. У роботах, перелік яких наведений вище, і в інших дослідженнях міститься недостатньо варіантів вирішення проблеми, націлених на врівноваження цінності, для максимізації ефективності проектів. Тобто, моделі та інструменти, що нададуть змогу балансувати роботи за проектом у відповідності до цінностями стейкхолдерів та приймати рішення, спрямовані на максимізацію задоволення очікувань через створення цінності в проекті та управління її донесенням до стейкхолдерів. Елементи теоретико-ігрового підходу до балансування цінностей стейкхолдерів проекту на основі біматричних ігор розглядаються в [16].

**Ціль дослідження.** Метою статті є розробка моделей підтримки прийняття рішень в плануванні та управлінні проектними роботами, спрямованими на балансування згідно з цінностями стейкхолдерів, підвищення ефективності та результативності реалізації проекту. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку задач, найважливішими з яких є: розкриття сутності балансування цінностей стейкхолдерів, вибір методів та розробка моделі балансування, визначення логіки та сценаріїв її застосування.

**Метод дослідження.** Фундаментальне дослідження характеру цінності ґрунтується на філософських концепціях та психологічних методах та моделях, що будуються навколо ознак цінності. З точки зору соціо-технічних систем, до яких належить управління проектами, моделі управління цінністю ґрунтуються на соціальних методах для інтерв'ювання, структуризування та аналізу даних, статистичних моделях та ін.

Під балансуванням цінностей стейкхолдерів ми маємо на увазі сукупність дій, які ведуть до збільшення одної або декількох цінностей для одного або декількох стейкхолдерів проекту у заданий момент часу. Оскільки точка зору стейкхолдерів може бути або позитивною або негативною, з одного боку, ми маємо певну єдність відношення думок на цінності до проекту та його корисного ефекту (співробітництво), і з іншого боку – розбіжність поглядів стейкхолдерів, зумовленою їх різною ціннісною орієнтацією (антагонізм).

Один з підходів, які демонструють успішні результати у вирішенні проблеми балансування конфлікту, це теорія ігор. Її основи закладені у фундаментальній роботі фон Неймана та Моргенштерна [17]. Використання теорії ігор робить можливим прогнозування та вибір найефективніших стратегій у конфліктних ситуаціях. Є сотні різних прикладів конфліктних ситуацій, які ефективно моделюються та управляються на основі теорії ігор. Вибір конкретної моделі має фундаментальне значення для досягнення визначеної цілі – забезпечення ефективності та результативності управління проектом. А концепція рівноваги Неша відіграє велику роль у вирішенні цієї проблеми.

**Основний матеріал дослідження.**

**Загальний вираз для оцінки змін у цінності продукту за допомогою врівноважувальних операцій.** У питаннях балансування цінності в проєктах необхідно приймати до уваги, що, хоча це звичайно застосовується до цінності, її зменшення є неприйнятним. Це зменшує привабливість корисного ефекту проєкту для стейкхолдерів та негативно впливає на їх участь у проєкті та, врешті, на хід його реалізації та відповідність вимогам трикутника управління проєктом [18]. Виходячи з цього, ми припускаємо, що будь-яка сукупність операцій з урівноваження цінності  $k$  врешті збільшує загальне значення  $B_k$  корисного ефекту проєкту

$$B_k = \sum_{k=1}^K z_j \cdot v_{ij} \cdot \Delta b_{ij} > 0, \quad (1)$$

де  $\Delta b_{ij}$  – зростання  $i$ -го значення в оцінці, виконуваної  $j$ -им стейкхолдером;

$v_{ij}$  – оцінка  $i$ -го значення, виконувана  $j$ -им стейкхолдером;

$z_j$  – потужність («вага»)  $j$ -го стейкхолдера;

$i = 1..I, I$  – кількість обраних значень;

$j = 1..J, J$  – кількість стейкхолдерів;

$K$  – загальна кількість операцій з урівноваження цінності.

Загалом, будь-яка елементарна операція з урівноваження цінності може спрямовуватися на збільшення цінності корисного ефекту проєкту через зміну в ній або у відношенні до стейкхолдера, оцінки якого аналізуються. При зміні корисного ефекту важливо розуміти, що задача збільшення цінності на початкових стадіях веде до зміни моделі продукту з точки зору стейкхолдерів, та після постачання мінімально життєздатного продукту до подальшої модифікації самого продукту [5; 19].

**Концепція балансування цінності стейкхолдерів проєкту.** Унікальність управління проєкту визначається його характером: ознаки проєкту, характеристики його команди, нестабільність зовнішнього середовища та інші фактори. Це, у свою чергу, проявляється в унікальності кожної ситуації проєкту, яка впливає на прийняття відповідних рішень.

Розвиток моделей для балансування цінностей стейкхолдерів має враховувати ключові ознаки цінності та процесів управління нею, які впливають на підхід до її врівноваження. Різні стейкхолдери проєкту, рухомі своїми цінностями, мають різне відношення до проєкту та його корисного ефекту. Та для зручності одержання та оцінки інформації про переваги стейкхолдерів вони мають бути згруповані за різними ознаками під час аналізу проєкту. Згідно з рекомендаціями РМВоК найчастіше вони використовують ставлення до проєкту та його корисного ефекту. Це ставлення може бути позитивним або негативним, але в будь-якому разі воно є. Саме через наявність різного ставлення ми включаємо особу до якоїсь групи стейкхолдерів проєкту.

Раціональне структурування проектних ситуацій дозволяє розробити типову форму ситуацій конфлікту цінностей, що аналізуються, та зменшити вплив унікальності проекту на прийняття рішень на основі теорії ігор. В результаті застосування цього методу надає можливість зменшити різноманітність можливих ситуацій в урівноваженні управління проектом, спрямованому на цінність, до достатньо малої кількості комбінацій, і таким чином вирівняти вплив унікальності ситуацій в управлінні проектом.

Зважаючи на особливості управління проектом (унікальність, нестабільність, суб'єктивність), найдоцільнішим є використання балансування робіт проекту у відповідності до цінностей стейкхолдерів на основі теорії некоаліційних матричних ігор. Це надає можливість розглядати можливість відсутності непримиренної конфронтації інтересів стейкхолдерів під час урівноваження цінності в проектах (тобто, конфлікт не є чітко антагоністичним).

Збереження стратегій, що ведуть до стану рівноваги, надає можливість урівноваження інтересів стейкхолдерів і таким чином забезпечити постійність в управлінні проектом, спрямованому на його реалізацію та завершення, з подальшим постачанням продукту замовнику. Сильною стороною цього підходу є здатність одержувати на його основі рекомендації щодо використання конкретних стратегій учасниками конфлікту. Тому, балансування цінності стейкхолдерів може бути зведена до кінцевої некоаліційної матричної гри двох гравців.

**Модель ігрового вирішення проблеми для балансування цінності стейкхолдерів проекту в загальній формі.** Гравці  $A$  та  $B$  мають стратегії  $m$  та  $n$  відповідно:  $A_1, A_2, \dots, A_m$  та  $B_1, B_2, \dots, B_n$ . У загальному випадку платежі гравців  $A$  та  $B$  представлені матрицями  $\mathbf{A}$  та  $\mathbf{B}$  відповідно

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Якщо гравець  $A$  застосує свою стратегію  $A_i$ , а гравець  $B$  застосує стратегію  $B_j$ , тоді платежі гравців знаходитимуться на відповідному перетинанні рядка  $i$  та колонки  $j$  у матрицях платежів:  $a_{ij}$  для  $A$  та  $b_{ij}$  – для  $B$ . З точки зору урівноваження цінності стейкхолдерів платіж гравця є нічим іншим, ніж збільшенням у цінності для групи стейкхолдерів, визначеної в (1).

Згідно з теоремою Дж. Неша будь-яка матрична гра має принаймні одну рівновагу у чистій або змішаній стратегії [20; 21]. Ідентифікація рівноваги є важливою, оскільки вона дозволяє визначити, чи існує там така комбінація стратегій гравців, відхилення від якої не призведе до збільшення виплат, за умови, що другий гравець збереже свій вибір [20-22].



Отже, головний результат вирішення моделі матричної гри показує чисту  $(i^{\#}, j; i, j^{\#})$  та змішану  $(x, y)$  стратегії пар гравців, що веде до стабільного стану системи управління проектом та гарантує найвищі цінності гри  $v_A$  та  $v_B$  для обох гравців  $A$  та  $B$  відповідно. Тому, взагалі задача балансування цінностей стейкхолдерів проекту може бути зведена до задачі лінійного програмування багатогранної множини

$$W \rightarrow \text{opt}, \{x, y \in \Omega\}. \quad (3)$$

Запропонована концептуальна модель балансування цінностей стейкхолдерів проекту на основі моделей матричних ігор містить п'ять логічних рівнів (проект, гравці, стратегії, комбінації стратегій гравців та рекомендовані стратегії), які описують концепцію та скомбіновані єдиною ієрархією. Цей загальний підхід надає можливість представляти, інтерпретувати та вирішувати різні задачі балансування цінності для будь-якого проекту. У кожному конкретному випадку ця узагальнена модель може бути роз'яснена, беручи до уваги особливості проекту та ціль балансування, як це буде обговорюватися нижче.

**Структура цінностей стейкхолдерів проекту.** На основі узагальнення дослідження аналізу цінності ідентифікуються підстави для визначення структури цінностей, урівноважених у проектах. Підґрунтям для цього набору слугують основні людські цінності, розроблені культурними вимірами С. Шварца та Г. Хофштеде. Їх комбінація дозволяє нам у повному обсязі визначити цілі проекту для кожного індивідуума. Ці цінності перетинаються зі структурами цінності, що пропонуються в стандарті P2M, PMBoK та принципах Agile. Проте, останні додають свої специфічні цінності, пов'язані з діяльністю в межах проекту. Для вирішення задачі балансування цінностей стейкхолдерів проекту відокремлюються два гравці (сторони конфлікту – менеджер проекту зі своєю командою та спонсор із замовниками продукту), взаємодія яких визначає ефективність та динаміку реалізації проекту. незважаючи на той факт, що взагалі цінності та інтереси менеджера проекту та членів команди не співпадають, у вирішенні цієї задачі вони згруповані через близькість інтересів. Окрім цього менеджер проекту має певні повноваження, що дозволяє йому схилити членів команди на свій бік. На основі цих аргументів для кожного з гравців визначається структура цінностей. До цінностей менеджера та команди проекту (гравець  $A$ ) відносяться автономія, задіяність, гнучкість, комфорт, реалізація персональної стратегії, безпека, етика, втілення стандартів. Щодо цінностей спонсора та стейкхолдерів (гравець  $B$ ) віднесено компетенцію, задіяність, досягнення, добробут, владу, безпеку, комунікацію, сталість.

**Загальні стратегії учасника врівноваження цінності стейкхолдерів проекту.** Для обрання типу ігрової моделі ми розглянемо ознаки конфлікту цінностей в управлінні проектом на прикладі будування моделі біматричної гри для двох гравців відповідно до менеджера проекту та його команди (гравець  $A$ ), а також груп стейкхолдерів (гравець  $B$ ). Потім, згідно з загальною логікою поведінки в конфлікті, та беручи до уваги особливості управління проектом, для гравця  $A$ , такі стратегії поведінки можуть змінити рівні оцінок цінності з точки зору стейкхолдерів: зміна продукту  $A_1$ ; зміна ставлення (сприйняття) стейкхолдерів  $A_2$ ; зміна ставлення менеджера та команди  $A_3$ ; зміна продукту та прийняття стейкхолдерів (комбінація  $A_1$  та  $A_2$ ); зміна продукту та ставлення менеджера та команди ( $A_1$  та  $A_3$ ); зміна прийняття стейкхолдерів та ставлення менеджера та команди ( $A_2$  та  $A_3$ ).

Відповідно до цього, стейкхолдери проекту можуть використовувати наступні стратегії: активне просування створення продукту  $B_1$ ; позитивне ставлення до проекту та продукту  $B_2$ ; нейтральне ставлення  $B_3$ ; негативне ставлення до проекту та продукту  $B_4$ ; активний спротив проекту та продукту  $B_5$ .

Комбінація цих стратегій та групування стейкхолдерів відповідно до їх ставлення до проекту та його продукту надає можливість імітувати будь-яку ситуацію в проекті з використанням ігрових моделей. Варіанти комбінацій стратегій для поведінки гравців визначається умовами конкретного проектного середовища: стосунки стейкхолдерів, досвід та знання менеджера проекту, стандарти компанії або команди, вимоги, що декларуються у статуті проекту і т. ін.

**Модель балансування цінності стейкхолдерів проекту як результат гри з нульовою сумою.** Теорія ігор тісно пов'язана з лінійною оптимізацією. Відомо, що кожна гра з нульовою сумою двох гравців  $A$  та  $B$  (виграш гравця  $A$  дорівнює програшу гравця  $B$  та навпаки) може бути представлена у формі задачі лінійної оптимізації.

*Математична модель для вирішення вихідної проблеми балансування цінностей стейкхолдерів проекту як гра з нульовою сумою.* Припустимо, що  $A = [a_{ij}]_{m \times n}$  позначає матрицю платежів (2) першого гравця  $A$ . Згідно з загальною задачею (3) ціллю першого гравця або цільової функції  $W_I$  є максимізувати свій виграш – ціна гри  $V$

$$W_I = v \rightarrow \max \quad (4)$$

У грі з матрицею платежів  $A = [a_{ij}]_{m \times n}$  стратегії гравця  $A$  задані впорядкованою множиною  $x$  ймовірностей (частот). У випадку багаторазового повтору гри гравець  $A$  має реалізувати свій набір чистих стратегій  $[A_1, A_2, \dots, A_m]$  із цінами, що відповідають  $x$ .



Оберіть найбільші значення для кожного стовпчика платіжної матриці  $\max(a_{ij}) = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$  для розрахунку цього виразу. Наступний етап це обрання найменшого програшу серед обраної групи  $\min_j \max_i(a_{ij})$ .

У разі однакових числових значень  $\alpha = \beta$  ми маємо розв'язок у чистих стратегіях. Відповідні стратегії  $A_k, B_l$  називаються оптимальними та рекомендуються для першочергового використання гравцями

$$A_k = A^{opt}, B_l = B^{opt}.$$

У цьому випадку ціна гри дорівнює  $V = a_{kl}$ .

Саме точка з позицією  $(k, l)$  на платіжній матриці є точкою рівноваги. Зазначимо, що гра з нульовою сумою може мати декілька точок рівноваги, але всі вони мають однакове числове значення ціни гри.

Відомо, що  $\alpha \leq \beta$ . У випадку отримання різних значень для  $\alpha$  та  $\beta$  ми маємо розв'язок у так званих мішаних стратегіях  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$  гравця  $A$  та  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$  гравця  $B$ . Ситуації  $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  дозволяють нам обчислити ціну гри на основі багаторазового повторення гри як математичне сподівання  $M(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  випадкового процесу  $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  з дискретними випадковими величинами у формі платіжної матриці  $A$ , що розраховується за формулою

$$M(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i y_j = V.$$

Це число є середнім очікуваним значенням, яке дорівнює ціні гри  $V$ . Треба зазначити, що

$$\alpha \leq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i y_j \leq \beta.$$

Наявність принаймні одного нульового значення серед мішаних стратегій відомо як вироджений розв'язок. Добре відомо, що найбільше число з ненульових значень у ситуації  $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  дорівнює рангу платіжної матриці  $A$  (кількість лінійно незалежних рядків або стовпчиків) [23; 24]. Оскільки

$$\text{rang}(A_{m \times n}) \leq \min(m, n),$$

це максимальне число буде дорівнювати максимуму найменшої вимірності платіжної матриці. З огляду на це постає питання корисності подальшого дослідження неквадратних платіжних матриць із точки зору існування мішаних стратегій. Проте, з практичного боку, ми можемо дійти

висновку, що для гравця вигідніше мати більше стратегій, оскільки це надає додатковій гнучкості менеджеру проекту.

*Застосування моделі для зрівноваження цінності стейкхолдерів проекту у розв'язку вихідної задачі як гри з нульовою сумою.* Уявімо, що для проекту матриця платежів, яка описує стратегії, наведені вище, та оцінки цінності стейкхолдерів мають наступну форму:

$$A = \begin{pmatrix} 7 & 1 & 4 & 4 & 8 & 8 & 6 \\ 1 & 8 & 5 & 3 & 3 & 4 & 5 \\ 9 & 8 & 7 & 7 & 1 & 5 & 5 \\ 5 & 6 & 2 & 8 & 6 & 7 & 6 \\ 1 & 6 & 8 & 8 & 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Загальна пряма задача оптимізації для гравця  $A$ , викладена в (4-6) є наступною:

$$W_1 = v \rightarrow \max$$

$$\begin{cases} 7x_1 + x_2 + 9x_3 + 5x_4 + x_5 \geq v; \\ x_1 + 8x_2 + 8x_3 + 6x_4 + 6x_5 \geq v; \\ 4x_1 + 5x_2 + 7x_3 + 2x_4 + 8x_5 \geq v; \\ 4x_1 + 3x_2 + 7x_3 + 8x_4 + 8x_5 \geq v; \\ 8x_1 + 3x_2 + x_3 + 6x_4 + 2x_5 \geq v; \\ 8x_1 + 4x_2 + 5x_3 + 7x_4 + 3x_5 \geq v; \\ 6x_1 + 5x_2 + 5x_3 + 6x_4 + x_5 \geq v; \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1; \\ x_i \geq 0, i = 1, \dots, 5. \end{cases}$$

Нижньою та верхньою цінами гри є  $\alpha = 2, \beta = 6$ . Задача має розв'язок у мішаних стратегіях

$$x = (0.39, 0.28, 0.14, 0.094, 0.089),$$

$$y = (0.021, 0.27, 0.28, 0.018, 0.41, 0, 0), \quad v = 4.9.$$

Розв'язок гарантує наступний розподіл (частоти) застосування мішаних стратегій для забезпечення балансування цінності стейкхолдерів.

Треба звернути увагу на те, що стратегії  $B_6, B_7$  є домінованими, і тому не включені у перелік стратегій, рекомендованих для гравця  $B$ .

**Модель балансування цінності стейкхолдерів проекту як розв'язок біматричної гри.** Розглянемо цю ситуацію на прикладі гри, в якій два гравці  $A$  та  $B$  мають свої власні неантагоністичні інтереси. Кожен гравець обирає незалежну стратегію поведінки. Гравець  $A$  має свої власні стратегії поведінки  $[A_1, A_2, \dots, A_m]$  і гравець  $B$   $[B_1, B_2, \dots, B_n]$  також.

Фундаментальним аспектом теорії біматричної гри є те, що у випадку обрання  $i$ -стратегії гравцем  $A$  та  $j$ -стратегії гравцем  $B$  обидва гравці одержують різні значення  $a_{ij}$  та  $b_{ij}$ . Тобто, на відміну від матричної гри, де  $b_{ij} = -a_{ij}$ , кожен гравець у біматричній грі одержує особисту індивідуальну цінність. Пошук комбінаторного простору в біматричній грі за допомогою перебирання надається у двох платіжних матрицях  $A$  та  $B$  (2).

Для біматричних ігор розв'язки можуть бути як чистими, так і мішаними стратегіями. Вирішення чистими стратегіями пов'язане з точкою рівноваги Неша по відношенню до елемента платіжної матриці  $(i^\#, j^\#)$ , коли виконуються наступні вимоги:

$$a_{ij^\#} \leq a_{i^\#, j^\#}, i = 1, \dots, m, b_{i^\# j} \leq b_{i^\# j^\#}, j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Оптимізаційний підхід може застосовуватися для розрахунку мішаних стратегій гравця  $A$   $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ . Задача оптимізації в цьому випадку має вигляд

$$W_I^A = v_A \rightarrow \max \quad (8)$$

$$\Omega_I^A : \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{21}x_2 + \dots + a_{m1}x_m \geq v, \\ a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{m2}x_m \geq v, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_m \geq v, \\ x_1 + x_2 + \dots + x_m = 1, \end{cases} \quad (9)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m. \quad (10)$$

Розв'язок цієї задачі дає нам частоти  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$  та ціну гри  $v_A$  для першого гравця  $A$ . Ми також можемо використовувати оптимізаційний підхід для визначення мішаних стратегій  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$  гравця  $B$ . Задача оптимізації має вигляд

$$W_I^B = v_B \rightarrow \max, \quad (11)$$



Нижня та верхня ціни гри для гравця  $A$  це  $\alpha_A=1, \beta_A=5$ , а для гравця  $B$   $\alpha_B=3, \beta_B=8$ . Задача має розв'язок у мішаних стратегіях

$$x_A = (0.12, 0.48, 0.17, 0.17, 0.056),$$

$$y_B = (0.26, 0.32, 0.16, 0.052, 0.20),$$

а ціни гри

$$v_A = 3.9, \quad v_B = 5.4.$$

Розв'язання надало гарантії наявності рівноваги для платіжних матриць із дотриманням балансу ціннісних інтересів гравців  $A$  та  $B$ , забезпечені застосуванням цих стратегій із заданими ймовірностями.

Загальна задача оптимізації для гравця  $B$  згідно з (11-13) виглядає наступним чином:

$$W_I^B = v_B \rightarrow \max,$$

$$\Omega_I^B : \begin{cases} 9y_1 + 6y_2 + 2y_3 + 3y_4 + 3y_5 \geq v_B; \\ 4y_1 + 3y_2 + 8y_3 + 9y_4 + 8y_5 \geq v_B; \\ 2y_1 + 8y_2 + 6y_3 + 6y_4 + 5y_5 \geq v_B; \\ 4y_1 + 3y_2 + 9y_3 + 2y_4 + 9y_5 \geq v_B; \\ 7y_1 + 5y_2 + 7y_3 + 4y_4 + 3y_5 \geq v_B; \\ y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 = 1; \end{cases}$$

$$y_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, 5.$$

Задача має вирішення у змішаних стратегіях

$$x_B = (0.36, 0.28, 0.25, 0.080, 0.028),$$

$$y_A = (0.13, 0.21, 0.088, 0.37, 0.20),$$

та цінах гри

$$v_A = 5.4, \quad v_B = 3.9.$$

Рівновага в чистих стратегіях визначається згідно з (7) для цих платіжних матриць у чотирьох ситуаціях:

- 1) для  $i^\# = 2$  та  $j^\# = 4$  –  $x = (0,1,0,0,0)$ ,  $y = (0,0,0,1,0)$ ,  $v_A = 5$ ,  $v_B = 9$ .
- 2) для  $i^\# = 3$  та  $j^\# = 2$  –  $x = (0,0,1,0,0)$ ,  $y = (0,1,0,0,0)$ ,  $v_A = 8$ ,  $v_B = 8$ .
- 3) для  $i^\# = 5$  та  $j^\# = 1$  –  $x = (0,0,0,0,1)$ ,  $y = (1,0,0,0,0)$ ,  $v_A = 7$ ,  $v_B = 7$ .
- 4) для  $i^\# = 5$  та  $j^\# = 3$  –  $x = (0,0,0,0,1)$ ,  $y = (0,0,1,0,0)$ ,  $v_A = 8$ ,  $v_B = 7$ .



Кожна ситуація рівноваги характеризується своїми платежами. У 4-му розв'язку  $(i^{\#}, j^{\#}) = (5, 3)$  рівновага характеризується більшою вигодою для команди проекту (гравець  $A$ ). Доцільним є дотримуватися другої пари стратегій у періоди стабільної роботи та під час реалізації проекту в режимі потрійної обмеженості. Перший розв'язок має застосовуватися на контрольних кордонах проекту або в період відхилення від основного плану проекту або при обставинах незадоволеності стейкхолдерів. Це є одною з можливостей «м'якого» управління проектом на основі застосування біматричних ігор.

Спільне застосування умов рівноваги, отриманих через використання запропонованої моделі та розробленого програмного забезпечення, надає можливість вирішувати різноманітні задачі ціннісно-орієнтованого управління проектом. Чисті стратегії дозволяють обирати логіку поведінки, що забезпечує найстабільнішу реалізацію проекту. А мішані стратегії допомагають контролювати баланс сил та внески груп стейкхолдерів до різного ставлення до проекту та його продукту.

**Висновок.** Запропонований теоретико-ігровий підхід до моделювання процесів ціннісно орієнтованого управління конфліктами в проектах на основі використання біматричних ігор та ігор з нульовою сумою дозволяє врівноважувати виконання робіт за проектом з урахуванням цінностей стейкхолдерів проекту. Використання засобів матричних ігор під час вирішення задачі балансування роботи за проектом у відповідності до цінностей стейкхолдерів надає можливість «м'якого» керування процесами реалізації проекту на різних етапах. Запропонований метод дозволяє сформуванню загальної моделі типової ситуації ціннісного конфлікту, яка може бути адаптована до умов будь-якого конкретного проекту та застосована в аналізі та прийнятті відповідних управлінських рішень. Подальше дослідження має бути спрямоване на аналіз аспектів прийняття рішень та збільшення результативності визначення цінностей стейкхолдерів для будівництва платіжних матриць.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kerzner H. *Value-driven Project Management* / H. Kerzner, F.P. Saladis. – New-York: John Wiley & Sons, 2009. – 281 p.
2. Бушуев С.Д., Бушуева Н.С., Ярошенко Р.Ф. *Модель гармонизації цінностей програм розвитку організації в умовах турбулентності оточення [The Model of Value Harmonization for Program of Organization Development in Turbulent Environment]. Управління розвитком складних систем. [The Management of Complex Systems Development].* – К.: КНУБА, 2012. – № 10. – С. 9-13.

3. *Principles behind the Agile Manifesto // Manifesto for Agile Software Development. – 2001. – Available at: <http://agilemanifesto.org/principles.html>. (accessed 10.12.2016).*
4. *Turner M. Microsoft Solutions Framework Essentials: Building Successful Technology Solutions. Microsoft Press. – 2006.*
5. *Rice E. The Lean Startup: How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses / E. Rice. – New York: Crown Business, 2011. – 336 p.*
6. *Rokeach M. The Nature of Human Values. – New York: Free Press, 1973.*
7. *Schwartz S. Basic Human Values: An Overview. – 2004. – The Hebrew University of Jerusalem.*
8. *Geert Hofstede. Dimensionalizing Cultures: The Hofstede Model in Context. – Universities of Maastricht and Tilburg. – 2011.*
9. *A Guidebook of Project & Program Management for Enterprise Innovation // PMJA. – 2005. – Available from [http://www.pmaj.or.jp/ENG/P2M\\_Download/P2MGuidebookVolume1\\_060112.pdf](http://www.pmaj.or.jp/ENG/P2M_Download/P2MGuidebookVolume1_060112.pdf)*
10. *Рач В.А. Цінність як базова категорія сучасної методології управління проектами [The value of a basic category of modern project management methodology] // Матеріали VII Міжнародної конференції «Управління проектами в розвитку суспільства» [Project management in social development]. – К.: КНУБА, 2010. – С. 167-168.*
11. *Аншин В.М. Исследование методологии и факторов ценностно-ориентированного управления проектами в российских компаниях [The Research of methodologies and factors of value-driven project management in Russian companies] Управление проектами и программами [Project and Program Management]. Изд. дом «Гребенников». – 2014. – № 2(38). – С. 104-110.*
12. *Ларичев О.И. Вербальный анализ решений [Verbal Decision Analysis]. Институт системного анализа РАН [System Analysis Institute of Russian Academy of Sciences]. – М.: Наука, 2006. – 181 с.*
13. *Grigorian T.G. Value-driven decision-making while choosing out-sourcers in the projects of municipal water supply systems reconstruction [Text] / T.G. Grigorian, K.V. Koshkin. – Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS. – 2015. – P. 527-530.*
14. *Grigorian T.G., Koshkin K.V. Improved models of value-oriented managing portfolios of projects for reconstruction of water supply // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 2/3(74). – P. 43-49.*

15. Григорян Т.Г., Шатковский Л.Ю. Модели процессов принятия решений при ценностно-ориентированном управлении требованиями в IT-проектах [The models of decision-making processes with value-driven requirement management in IT-projects]. Управління проектами та розвиток виробництва [Project management and development of production]. – Луганськ. – 2016. – № 2 (58). – С. 81-98.
16. Grigorian T.G. A game-theoretic approach to harmonization the values of project stakeholders [Text] / T.G. Grigorian, S.D. Titov, A.Y. Gayda V.K. Koshkin. – Proceedings of the XII-th International Scientific and Technical Conference: Computer Sciences and Information Technologies, CSIT. – 2017. – P. 527-530.
17. Von Neumann J., Morgenstern O. Theory of Games and Economic Behavior, 1953, Princeton University Press.
18. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Fifth Edition, PMI, 2013. – 590 p.
19. Denne M. Software by Numbers, Low-Risk, High-Return Development [Text] / M. Denne, J. Cleland-Huang, Prentice-Hall, 2003.
20. Nash J. Non-Cooperative Games. The Annals of Mathematics. – 1951. – 54(2):286-295.
21. Воробьев Н.Н. Ситуации равновесия в биматричных играх [The situation of equilibrium in bimatrix games] // Теория вероятностей и ее применения [Probability Theory and its Applications]. – М.: Наука, 1958. – № 3. – 318-331 с.
22. Воробьев Н. Н. Бескоалиционные игры [Noncooperative games]. – М.: Наука, 1984. – 495 с.
23. Тявляшев А.Д., Литвин О.Г. Вища математика у прикладах та задачах. Ч.1 Лінійна алгебра та аналітична геометрія. Диференціальне числення функції однієї змінної. – К.: Кондор, 2005. – 588 с.
24. Blyth T.S., Robertson E.F. Basic linear algebra. – London: Springer, 2002. – 245 p.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2017

#### Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, директор ННІКНУП,  
Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова,  
м. Миколаїв **К.В. Кошкін**

УДК 656.612: 621.72

А.И. Леонтьева

**ОЦЕНКА ЦЕННОСТИ ПРОЕКТОВ  
ТЕХНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Предложен метод оценки ценности проектов технического развития предприятий, в основе которого – операции над нечеткими числами. Для формирования составляющих оценки ценности проанализировано влияние уровня технического развития предприятия на его конкурентоспособность. Идентифицированы основные виды проектов технического развития. На примере контейнерного терминала морского торгового порта определены цели технического развития, и в качестве локальных ценностей проекта определен их вклад в достижение каждой цели, предложен подход к вычислению интегральной оценки ценности проекта.*

**Ключевые слова:** проект, техническое развитие, ценность, нечеткие числа.

*Запропоновано метод оцінки цінності проектів технічного розвитку підприємств, в основі якого – операції над нечіткими числами. Для формування складових оцінки цінності проаналізовано вплив рівня технічного розвитку підприємства на його конкурентоспроможність. Ідентифіковано основні види проектів технічного розвитку. На прикладі контейнерного терміналу морського торгового порту визначені цілі технічного розвитку, і в якості локальних цінностей проекту визначено їх внесок у досягнення кожної цілі, запропонований підхід до обчислення інтегральної оцінки цінності проекту.*

**Ключові слова:** проект, технічний розвиток, цінність, нечіткі числа.

*A method of the project value estimating for the technical development of enterprises is proposed, based on the operations with fuzzy numbers. To form the components of the value assessment, the impact of the level of the company's technical development to its competitiveness has been analyzed. The main types of technical development projects are identified. On the example of the seaport container terminal the objectives of technical development have been defined, and as their local values of the project their contribution to the achievement of each goal has been determined. An approach for calculating the integral valuation of the project value has been proposed.*

**Keywords:** project, technical development, value, fuzzy numbers.

**Введение.** Техническое развитие является одним из направлений развития предприятий и формирует базу для достижения определенных экономических результатов, а также обуславливает их конкурентоспособность.

Согласно с мнением специалистов (например, [1]), техническое развитие предприятия – процесс формирования и совершенствование технико-технологической базы предприятия, ориентированный на конечные результаты его хозяйственной деятельности за счет технико-технологических нововведений.

Таким образом, техническое развитие предприятия отражает соответствие состава технических средств и технологий определенным требованиям.

При этом результаты технического развития влияют, прежде всего, на изменение технического уровня производства, который, согласно [2], характеризует степень развития средств производства и прогрессивность технологий и определяется следующими факторами: уровень механизации и автоматизации производства; уровень прогрессивности технологических процессов; средний возраст технологического оборудования; капиталоемкость труда.

Техническое развитие, как и любые другие мероприятия по развитию предприятий, реализуется посредством проектов или программ. Как специфическая категория проектов, проекты технического развития характеризуются, в том числе, специфичностью их ценности. В свою очередь, ценность проекта является основополагающей в процессах отбора. Поэтому оценка, в наибольшей степени отражающая реальную ценность проекта технического развития, позволит обеспечить адекватность существующим условиям выбор проекта и учесть его реальный вклад в формирование конкурентоспособности предприятия и достижения определенных экономических результатов.

#### **Анализ литературы и выделение нерешенной части проблемы.**

Ценность проекта – это то, что формируется в результате реализации проекта ([3]). Согласно мнению отдельных специалистов (например, [4]), ценность проекта – это его соответствие стратегическим целям предприятия.

Такой подход является альтернативой классическому варианту оценки проектов или формированию программы развития или портфеля проектов на базе экономической эффективности инвестиций. Развитию такого подхода способствовали исследования процессов управления социальными, экологическими проектами, которые не предполагают обеспечение экономической эффективности инвестиций, во всяком случае, в явном виде. Более того, даже многие коммерческие проекты достигают нефинансовых целей отводят приоритетную роль, в силу необходимости, например, повышения конкурентоспособности или завоевания определенных рыночных позиций.

На основании этого тезиса в современных исследованиях разработаны подходы к оценке ценности программ и портфелей предприятия. В качестве примеров таких исследований можно привести труды [4; 5], в которых, в частности, интегральная оценка проекта формируется на базе нечетких чисел, характеризующих соответствие проекта семи заданным

критериям. При этом в качестве одного из критериев выступает соответствие проекта миссии и целям. В [6] при формировании мультипроекта судоходной компании рассматривается интегральный показатель соответствия мультипроекта стратегическим целям предприятия (в данном случае, судоходной компании). В [7; 8] на базе целей программы и ее подпрограмм формируется так называемый «образ программы», который состоит из количественных показателей оценки ценности подпрограмм и программы. В качестве основной идеи отбора проектов в программу в [8] предлагается учет соответствия ценности проекта ценностям программы и подпрограмм.

Таким образом, идея сопоставления целей предприятия и ценности проектов находит свое отражение в формализованных подходах к выбору проекта или отбора проектов в мультипроект, программу, портфель.

Тем не менее, указанные выше подходы являются либо абстрагированными от специфики проекта (программы, портфеля, мультипроекта), либо ориентированы на коммерческие проекты, с соответствующими целями и ценностями.

Проекты технического развития, которые формируют специфическую категорию проектов, прежде всего, практически всегда являются не коммерческими проектами, а направлены на развитие предприятий в определенном контексте.

Несмотря на отдельные обращения современных ученых к проблеме технического развития посредством проектов, существующие работы ориентированы исключительно на экономическую оценку данных проектов. В частности, данный подход положен в основу работ [9-11]. Так как эти работы в качестве предметной области рассматривают автотранспорт, то, по нашему мнению, именно специфика данного вида транспортного производства и бизнеса, а также относительно невысокий уровень инвестиционных вложений и практическое отсутствие появления масштабных специфических инноваций обосновывают правомерность использования указанного подхода.

В ряде отраслей, например, в морской транспортной отрасли, техническое развитие связано со значительным уровнем инвестиций (в большинстве случаев), при этом для некоторых предприятий морского транспорта техническое развитие является не просто возможностью роста, а иногда и необходимостью выживания на рынке морских транспортных услуг.

Поэтому для отбора проектов технического развития должен быть сформирован специфический перечень требований и разработан соответствующий инструментарий, включая метод оценки ценности данной категории проектов, который бы являлся достаточно универсальным с точки зрения отраслевой специфики проектов.

**Цель исследования.** Таким образом, целью данного исследования является разработка метода оценки ценности проектов технического развития предприятий.

**Результаты исследования.** Положив за базис тезис о соответствии проекта поставленным целям в качестве идеи оценки ценности, следует определиться со специфическими целями технического развития предприятий.

По нашему мнению, которое соответствует мнению многих современных специалистов, основной целью любого развития предприятия является его конкурентоспособность, то есть возможность предприятия быть потенциально способным противостоять конкурентам или превосходить их, а следовательно, производить продукцию или оказывать услуги, способные успешно конкурировать с аналогами конкурентов.

На конкурентоспособность предприятия оказывает влияние множество факторов, которые могут быть детализированы с различной степенью. Определим те факторы влияния на конкурентоспособность, которые взаимосвязаны с состоянием технического развития предприятия. Здесь следует отметить что, естественно, все составляющие уровня технического развития вносят свой вклад в конкурентоспособность. Тем не менее, в сложившихся условиях, с учетом специфики конкурентного окружения и внешней среды в целом, отдельные составляющие имеют приоритетное значение.

Проанализируем, что, по мнению современных авторов, понимается под уровнем или состоянием технического развития предприятия.

В [12] в качестве обобщения показателей, характеризующих уровень технического развития в различных источниках, предлагаются следующие:

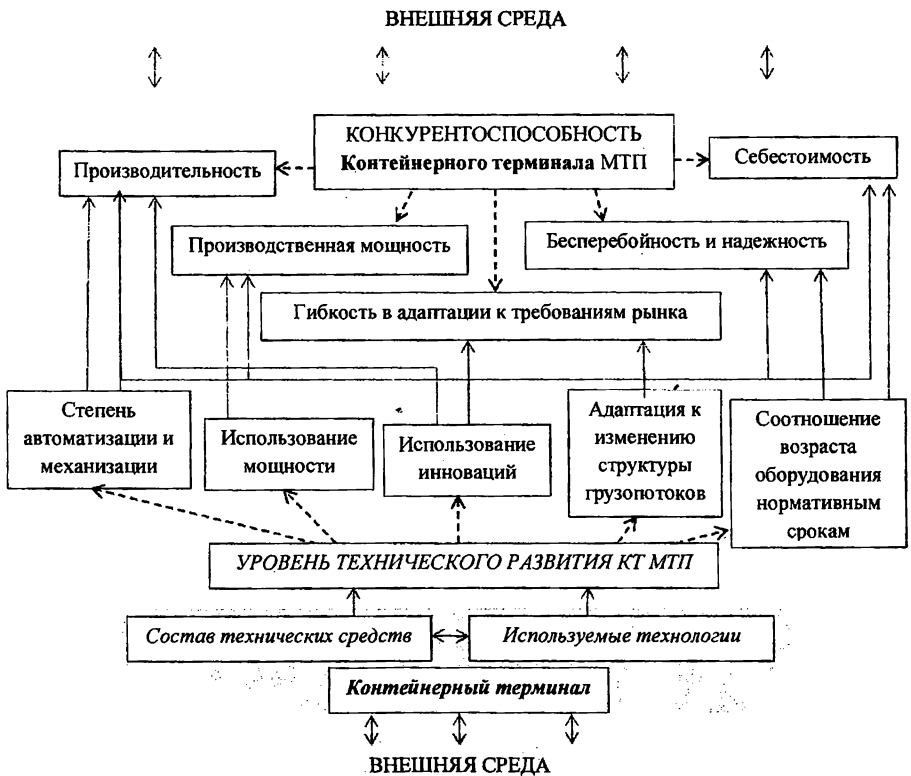
- 1) использование производственных мощностей предприятия;
- 2) соответствие среднему сроку оборудования нормативному;
- 3) соответствие фондовооруженности труда работающих основного и вспомогательного производств;
- 4) гибкость и адаптивность предприятий к нововведениям и потребностям рынка.

В [13] авторы для оценки уровня технологического развития предприятия (синоним термина «техническое развитие») предлагают оценку технологического потенциала по следующим направлениям:

- 1) уровень прогрессивности технологий;
- 2) технико-экономические показатели технологий производства;
- 3) уровень механизации и автоматизации производства;
- 4) степень экологичности технологической базы;
- 5) уровень проведения научно-исследовательских и исследовательско-конструкторских разработок;
- 6) степень развития технологической инфраструктуры.

В [14] автор считает, что одними из ключевых показателей технологического развития предприятия являются показатели сбалансированности всех протекающих на нем технологий, то есть оценка уровня технологического развития предприятий должна содержать систему показателей, характеризующих технологический уровень всех процессов по созданию добавленной стоимости, протекающих на предприятии, их совместимость и соответствие друг другу по количественным и качественным характеристикам.

Следующим этапом исследования определим факторы конкурентоспособности предприятия, которые связаны с уровнем его технического развития. Для конкретизации данного процесса рассмотрим в качестве примера конкурентоспособность контейнерного терминала в морском торговом порту (рис. 1).



*Рис. 1. Влияние уровня технического развития на конкурентоспособность на примере контейнерного терминала в морском торговом порту*



Основными факторами конкурентоспособности, которые непосредственно связаны с уровнем технического развития контейнерного терминала, являются:

- *Себестоимость* – уровень себестоимости влияет на формирование тарифной политики терминала. Так, например, относительно низкий уровень себестоимости позволит обеспечить более привлекательные цены для клиентов. При этом на себестоимость влияет возраст используемых технических средств (более старая техника требует более значительных затрат на ремонты, расходные материалы, топливо). Также на себестоимость влияет уровень используемых инноваций, которые, в том числе, направлены на обеспечение экономичности эксплуатируемого оборудования. Степень автоматизации и механизации сокращает время выполнения технологических циклов и уменьшает ошибки, связанные «человеческим фактором», а, следовательно, обеспечивает, в конечном итоге, уменьшение себестоимости.

- *Бесперебойность и надежность* – аналогично себестоимости, связана с возрастом техники, степенью используемых инноваций, и уровнем автоматизации и механизации.

- *Производительность* – заданный уровень производительности обеспечивается, прежде всего, составом технических средств и используемых технологий. При этом возраст и степень внедренных инноваций влияют на эту величину. Также уровень производительности связан с бесперебойностью и надежностью, поэтому все составляющие влияния уровня технического развития на этот фактор влияют и на производительность.

- *Производственная мощность* определяет возможности терминала по освоению грузопотоков, проходящих через порт. При этом степень использования производственной мощности определяет, с одной стороны, «резерв» для дальнейшего наращивания объемов работы; с другой стороны, практическое отсутствие данного резерва сигнализирует о необходимости развития технического уровня.

- *Гибкость в адаптации к требованиям рынка* – формируется под влиянием «приспособленности» терминала к изменению структуры грузопотоков (например, «контейнеризировать» грузы, которые традиционно не подлежали контейнеризации), таким образом, составляя в некоторых случаях конкуренцию другим комплексам порта. Возможность указанной адаптации обеспечивается, в том числе, уровнем используемых инноваций.

Таким образом, взяв за основу предлагаемые различными авторами показатели оценки уровня технического развития предприятия и выбрав из них те, которые в большей степени связаны с конкурентоспособностью предприятия (на примере контейнерного терминала), мы идентифицировали их влияние на составляющие конкурентоспособности.

Для вычисления или количественной оценки указанных показателей технического развития могут быть использованы существующие методики и подходы. Таким образом, в рамках данного исследования задача оценки указанных показателей не рассматривается и предполагается, что по известным методикам и подходам данные показатели могут быть вычислены.

Сопоставление текущей конкурентоспособности предприятия и перспектив ее развития приводит к необходимости формирования целей повышения уровня технического развития и перечня соответствующих мероприятий (рис. 2).

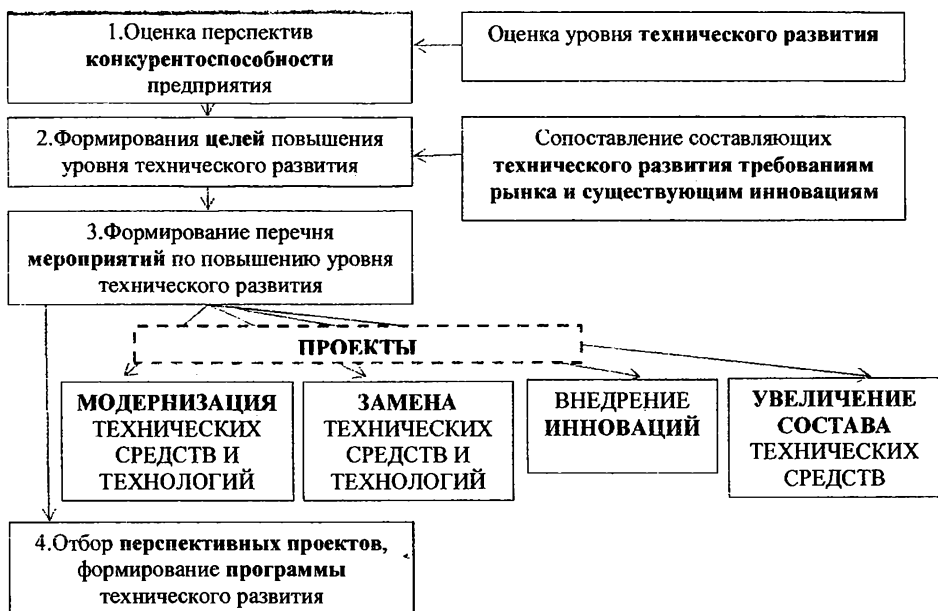


Рис. 2. Последовательность этапов в процессах принятия решений по проектам технического развития

Как выше было отмечено, мероприятия по техническому развитию реализуются посредством проектов или программ и могут являться частью портфелей проектов предприятия.

В качестве основных проектов технического развития предприятий вне зависимости от специфики их деятельности выступают следующие:

- Проекты модернизации технических средств и технологий (за базу принимаются существующие технические средства и технологии, в состав которых внедряются определенные изменения);
- Проекты по замене технических средств и технологий (отслужившее свой нормативный срок оборудование или устаревшая технология заменяются новыми, в большинстве случаев, более прогрессивными, с

учетом определенных изменений в производстве оборудования и используемых технологий);

- Проекты увеличения состава технических средств связаны, как правило, с необходимостью увеличения мощности предприятия и предполагают ввод дополнительных единиц техники к уже имеющемуся составу техники и технологий.

- Проекты внедрение инноваций – могут быть связаны как с заменой технических средств и технологий, так и с увеличением их количественного состава, но, в отличие от предыдущей категории проектов, предполагают использование новейших разработок в данной области.

Выше были определены пять показателей состояния технического развития предприятия (см. рис. 1), которые могут быть использованы для формулировки целей технического развития. Отметим, что цели развития могут не обязательно охватывать все направления, то есть множество целей может быть меньше пяти. Также множество целей может превышать пять выделенных позиций в тех случаях, когда каждому направлению соответствует несколько целей. Например, «использование инноваций» и соответствующая агрегированная цель «повышение уровня использования инноваций» может быть детализирована с учетом направленности инноваций – экономичность, экологичность, эргономичность и т.д.

Пусть выделены  $C_i, i = \overline{1, n}$  – цели технического развития предприятия.

При этом могут быть установлены приоритеты в достижении целей  $\alpha_i, i = \overline{1, n}$ , которые, в соответствии с традиционным подходом должны удовлетворять требованию  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ .

Для определения ценности проектов технического развития предлагается использовать аппарат теории нечетких множеств. При этом под «ценностью» проектов будем понимать их вклад в достижение целей технического развития, которые формируются на базе показателей технического развития.

Нечеткие числа, в данном случае, описывают цели и соответствующие результаты реализации проектов.

Нечеткий вид целей обосновывается тем, что на практике, формулируя, например, цель – «достижение мощности 300000 TEU./в год» (если в качестве примера рассматривать контейнерный терминал), компания фактически даже достижение 280000 TEU./в год может считать как практическое достижение указанной цели. Или иначе, компания ставит «нечеткую» цель – «достижение мощности 280000-300000 TEU./в год». При этом возможны различные приоритеты: достижение 280000 TEU./в год считается обязательным, а 300000 TEU./в год – желательным. Возможна и обратная ситуация: достижение 300000 TEU./в год считается обязательным, а 280000 TEU./в год – приемлемым и т.п. Такая «нечет-

кость» обуславливается, прежде всего, «нечеткостью» спроса (в данном случае, на обработку контейнеров). Действительно, на практике перспективный спрос фактически не может быть оценен конкретным числом, и прогнозирование спроса предполагает оценку некоего диапазона его значений. Поэтому и соответствующая цель также во многих случаях не может быть задана конкретным числом.

Аналогичным образом, можно обосновать «нечеткий» вид количественной оценки результатов реализации проектов технического развития. В [15], в частности, обосновывается, что неопределенность внешней среды, высокая степень ее турбулентности, и неопределенность самого процесса реализации проекта определяют необходимость отказа от детерминированного подхода к оценке и выбору проектов, особенно в портовой сфере.

При формировании дальнейшей формализации за базу приняты результаты исследований [15-19], связанные с теорией и практическим применением нечетких чисел.

Отметим, что с нечеткими числами связано понятие «функция принадлежности», построение которой может быть осуществлено различными методами, в том числе на базе статистических данных или мнений экспертов (характеристика методов, в частности, представлена в [18; 19]). В [15; 16] принят трапециевидный вид нечетких чисел, как в наибольшей степени соответствующий пессимистическим, оптимистическим и наиболее вероятным оценкам той или иной результирующей величины в ситуациях, когда информация о приоритетности той или иной оценки недоступна.

Независимо от принимаемого в дальнейшем вида нечетких чисел и функций принадлежности, будем полагать, что  $\mu_{C_i}(x), i = \overline{1, n}$  – функция принадлежности, соответствующая поставленным целям,  $x$  – возможные значения нечеткого числа.

Пусть к рассмотрению представлено  $m$  проектов технического развития. Соответственно, результаты реализации данных проектов с позиции достижения целей могут быть охарактеризованы следующим набором:

$$\left\langle \mu_{P_j}^1(x), \mu_{P_j}^2(x), \dots, \mu_{P_j}^n(x) \right\rangle, j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где  $\mu_{P_j}^1(x), \mu_{P_j}^2(x), \dots, \mu_{P_j}^n(x)$  – результаты реализации  $j$ -го проекта с позиций каждой цели.

Согласно правилам нечеткой логики, вклад каждого проекта в достижение целей может быть определен как произведение нечетких чисел

$$\left\langle \mu_{P_j}^1(x) \cap \mu_{C_1}(x), \mu_{P_j}^2(x) \cap \mu_{C_2}(x), \dots, \mu_{P_j}^n(x) \cap \mu_{C_n}(x) \right\rangle, j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

При этом вклад каждого проекта в достижение цели (локальная ценность) есть также нечеткое число с функцией принадлежности

$$\mu_j^i(x) = \mu_{\Pi_j}^i(x) \cap \mu_{Ц_i}(x), i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

В дальнейших процессах отбора проектов для реализации могут участвовать как отдельные – локальные ценности проектов (под «локальными» имеются в виду отдельные ценности вида (3) с точки зрения конкретной цели); так и интегральные оценки ценности с позиции целей технического развития в целом.

Для получения интегральной оценки ценности проекта технического развития на основании локальных оценок следует провести процедуру «дефаззификации», суть которой – сведение нечеткого числа к числовому значению. При этом дефаззификация необходима как для вкладов проектов в достижение целей (3), так и для самих целей.

В специальной литературе содержится описание различных методов дефаззификации, в частности, в [21] представлены следующие:

- метод центра тяжести;
- метод центра площади;
- метод левого модального значения;
- метод правого модального значения.

В [16] представлен метод сведения нечеткого числа к действительному числу для случая трапециевидных нечетких чисел. В частности, для получения числовой оценки применен метод Чанга.

После получения числовых оценок (с помощью описанных в специальной литературе методов) по каждой цели, следующим этапом является формирование непосредственно интегральной оценки ценности

$$I_j^c = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{X_j^i}{X^i}, j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

где  $X_j^i$  – число, соответствующее вкладу  $j$ -го проекта в достижение  $i$ -ой цели,  $X^i$  – числовая оценка выражения  $i$ -ой цели.  $X_j^i$  и  $X^i$  получены в результате процедуры дефаззификации.

**Выводы.** В результате проведенного исследования разработан метод оценки ценности проектов технического развития, в основе которого операции над нечеткими числами. Для формирования составляющих оценки проанализировано влияние уровня технического развития предприятия на его конкурентоспособность. Идентифицированы основные виды проектов технического развития. На примере контейнерного терминала морского торгового порта определены цели технического развития и в качестве локальных ценностей проекта определен их вклад в достижение каждой цели. В качестве интегральной оценки ценности предложена процедура дефаззификации.

Развитием представленных результатов является формирование модели выбора проектов и формирования программы технического развития на базе локальных и интегральных оценок ценностей рассматриваемого множества проектов.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мухтаров Ш.Г. Разработка планов технического развития предприятия // *Фундаментальные исследования*. – 2007. – № 12-2. – С. 284-285.
2. *Техническое развитие предприятия [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <https://arhclub.info/distiplina-innovatsionnyj-menedzhment-lektsii/140-tehnicheskoe-razvitie-predpriyatija.html>
3. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)-Fifth Edition [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <http://onlinelibrary.wiley.com>
4. Кононенко И.В. Метод формирования портфеля проектов / И.В. Кононенко, К.С. Букреева // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 6/2(42). – 2009. – С. 15-19.
5. Кононенко И.В. Модель и метод оптимизации портфелей проектов предприятия для планового периода / И.В. Кононенко, К.С. Букреева // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 1/2(43). – 2010. – С. 9-11.
6. Експериментальне дослідження формування змісту мульти-проекту розвитку судноплавного підприємства / Л.А. Павловська, Ю.С. Прихно // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2016.
7. Онищенко С.П. Формирование оптимального состава программы развития предприятия / С.П. Онищенко, Е.С. Арабаджи // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2011. – Т. 6. – № 3 (54). – С. 60-66.
8. Онищенко С.П. Структура, цель, продукт и ценность программ развития предприятий / С.П. Онищенко, Е.С. Арабаджи // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*. – 2011. – № 33. – С.175-186.
9. Біліченко В.В. Показники конкурентної ситуації автотранспортних підприємств при розробці проектів технічного розвитку виробництва / В.В. Біліченко, Є.В. Смирнов, С.В. Цимбал // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. – 2007. – № 6 (112). – С. 56-59.
10. Біліченко В.В. Моделювання стратегій технічного розвитку виробництва підприємств автомобільного транспорту / В.В. Біліченко, Є.В. Смирнов // *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. – 2006. – № 3-4. – С. 21-24.

11. Біліченко В.В. Модель обґрунтування стратегій технічного розвитку виробництва на автомобільному транспорті / В.В. Біліченко, Є.В. Смирнов // Проблеми підвищення ефективності інфраструктури: Зб. наук. праць. – Вип. 19. – К.: НАУ, 2008. – С. 271-274.
12. Штепа М.В. Оценка технического развития предприятий в условиях конкуренции // Российское предпринимательство. – 2013. – Т. 14. – № 5. – С. 33-40.
13. Рачинская Г.В. Оценивание уровня технологического развития предприятий / Г.В. Рачинская, Л.С. Лисовская // Вестник НУ «Львовская политехника». – 2011. – № 631. – С. 278-282.
14. Беляков Г.П. Понятие и экономическая сущность научно-технологического развития / Беляков Г.П., Кочемаскин А.Н. // Проблемы современной экономики. – 2014. – № 1. – С.38-41.
15. Руденко С.В. Разработка концепции отбора проектов и ее формализация в условиях отсутствия полноты информации / С.В. Руденко, В.А. Андриевская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 2(3). – С. 4-10.
16. Аньшин В.М. Модели управления портфелем проектов в условиях неопределенности / В.М. Аньшин, И.В. Демкин, И.М. Никонов, И.Н. Царьков. – М.: МАТИ, 2007. – 117 с.
17. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – 1. – P. 3-28.
18. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и Связь, 1982. – 431 с.
19. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 206 с.
20. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
21. Рубанов В.Г., Филатов А.Г., Рыбин И.А. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nrsu.bstu.ru>

Стаття надійшла до редакції 20.11.2017

#### Рецензенти:

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Комерційне забезпечення транспортних процесів» Одеського національного морського університету **С.П. Онищенко**

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Підприємництво» Одеського національного морського університету **Г.С. Махуренко**

УДК 378.147:004

В.П. Бреднёва, Л.В. Кошарская

### О ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ОБУЧЕНИЯ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ

*В статье рассматривается методология использования дистанционных технологий как неотъемлемая часть оценки качества обучения и информатизации учебного процесса, а также представлены предварительные результаты апробации дистанционного обучения студентов. Формулируются новые возможности практического применения дистанционных технологий и тестирования при организации процесса обучения.*

**Ключевые слова:** дистанционные технологии, качество обучения, информационный процесс обучения, оценка знаний, компетенции, тестирование.

*В статті розглядається методологія використання дистанційних технологій як невід'ємна частина оцінки якості навчання та інформатизації навчального процесу, а також надані попередні результати практичної апробації дистанційного навчання студентів. Формулюються нові можливості практичного застосування дистанційних технологій і тестування при організації процесу навчання.*

**Ключові слова:** дистанційні технології, якість навчання, інформаційний процес навчання, оцінка знань, компетенції, тестування.

*The following article looks at the example of practical implementation of e-learning. The process of using distance technologies is considered as an integral part of teaching quality assessment and education process informatization. The authors formulate new practical implementation possibilities of distance technologies and testing about arrangement of teaching process.*

**Keywords:** distance technologies, teaching quality, teaching process informatization, assessment of knowledge, competences, testing.

**Введение.** Дистанционное обучение позволяет конструировать учебный материал с учетом дифференциации творческой деятельности студентов, их возможностей и желания самостоятельно повышать свой профессиональный уровень, приводит к расширению педагогических методов и изменению характера всего учебного процесса.

На современном этапе дистанционная форма обучения в Украине развивается, на наш взгляд, прежде всего, в направлении получения определенного уровня образования, а также с целью сертификационного обучения.



Цель обучения традиционно рассматривается как приобретение студентом системы умений и знаний, которые формируются согласно модели специалиста.

**Постановка проблемы.** При целенаправленном дистанционном учебном процессе компоненты обучения имеют некоторые отличия от традиционных, а именно:

- содержание обучения представляет собой модель социального заказа, которая описывается учебным планом, учебными программами, учебным материалом по каждой дисциплине;

- объекты обучения – это студенты, которые должны проявлять настойчивость, стремление к знаниям, организованность, умение работать самостоятельно и иметь навыки работы с компьютером и другими интерактивными средствами;

- субъекты обучения – это преподаватели, которые остаются главным звеном в обеспечении эффективности учебного процесса, хотя содержание их педагогической деятельности существенным образом изменяется.

Наиболее востребованы в настоящее время технологии дистанционного образования, пригодные для получения второго высшего образования, а также для заочного образования.

В представленной работе обобщаются предварительные результаты практической апробации дистанционного обучения студентов инженерных специальностей

**Основной материал.** Реформа системы высшего образования на современном этапе по сути, в первую очередь, направлена на решение задачи подготовки компетентного и конкурентоспособного специалиста на отечественном и европейском рынке труда [1-4]. Эксперты отмечают, что до сих пор не более 17 % образовательного рынка приходится на дистанционное обучение, хотя другие исследования показывают, что такой формат обучения порой даже эффективнее привычной нам формы получения образования: скорость запоминания материала выше на 15-20 %, при этом времени на прохождение курса требуется на 35-40 % меньше. Американские и Европейские исследователи утверждают (American Educational Research Association), что к 2018 г. примерно 2/3 всей системы образования будет осуществляется дистанционно. Это объединяет и студентов, и специалистов, имеющих возможность получать второе высшее образование, так как специалист через некоторое время перестает отвечать требованиям современного уровня науки. Рассмотрим негативные и позитивные стороны этого процесса, который включает возможности и преимущества электронного обучения. Связь между студентами и преподавателями при дистанционном обучении поддерживается, как правило, через Интернет. Это, по мнению некоторых авторов, негативный фактор, но, по мнению других – позитивный.

Существует мнение, что виртуальное обучение предполагает и виртуальные знания, далекие от реальности. Знание, полученное любым путем, будет виртуальным: информация, прежде чем стать знанием, проходит через сложные когнитивные процессы.

Важным недостатком дистанционного образования является отсутствие прямого контакта между преподавателем и учащимися, что снижает качество обучения. В структуре заочного обучения большинства вузов отводится крайне мало времени на учебное общение. Это общение на лекциях, несколько больше общения на практических занятиях, при написании курсовых работ и курсовых проектов, но все равно этого мало.

Кроме того, известно, что почти 85 % информации воспринимается человеком через зрение, а остальное – через другие сенсорные системы. Ряд авторов предполагает, что качество знаний, полученных при дистанционном обучении ниже, чем при очном. Это, на наш взгляд, в решающей степени зависит от участников образовательного процесса и качества учебных программ. Другой фактор, влияющий на качество образования – мотивация учащихся. Те, кто хочет учиться дистанционно, уже имеют определенную базу знаний, хотя бы в области современных средств коммуникации и ориентированы именно на получение знаний, на получении навыков, нужных ему в будущей работе. Стало стандартом и активно используется в обучении применение учебных материалов в виде графиков, таблиц и формул для произведения обучающимися собственных вычислений, тесты в реальном времени и контрольные интерактивные вопросы на закрепление материала. На сегодняшний день, к сожалению, не каждый студент заочного отделения может позволить себе тратить время на сессию, а деньги на оплату проезда до института иногда немалые. Существуют и проблемы с Интернетом, который присутствует далеко не в каждом учебном заведении.

Любая учебная дисциплина определяется как организационно-содержательная компонента педагогической системы, в которой реализуется учебный процесс приобретения знаний и умений в определенной предметной области. Учебный процесс может включать в себя как традиционные, так и дистанционные технологии.

Дистанционный курс (ДК) – это особая, основанная на дистанционной технологии форма предоставления содержания и организации всей учебной дисциплины или определенной ее части.

ДК представляет собою дидактический, программный и технический комплекс, с помощью которого можно достаточно эффективно реализовать цикл по изучению дисциплины, используя при этом как традиционные, так и дистанционные учебно-информационные компоненты (лекции, практические и лабораторные занятия, консультации, контрольные мероприятия и т.п.).

Необходимо обратить внимание на преимущества и недостатки дистанционных курсов.

Основные преимущества:

- относительно гибкий график организации учебного процесса во времени;
- место пребывания преподавателя и студентов произвольное;
- возможность полного мониторинга учебной деятельности студента;
- повышение уровня индивидуализации обучения;
- автоматизация проведения контрольных мероприятий.

Нужно выделить и недостатки:

- наличие дополнительных требований к информационной и телекоммуникационной культуре как преподавателей, так и студентов;
- сложное и дорогое материально-техническое обеспечение;
- относительно высокая стоимость доступа в Интернет.

При разработке ДК полнота предоставления учебно-методических материалов приобретает особое значение. Они должны включать ответы на все вопросы, которые могут возникнуть у студента как по методике изучения курса, так и непосредственно по учебному материалу (методика ответов на контрольные вопросы, тестовые задания и т.д.)

В традиционном учебном процессе объем и структура каждой учебной дисциплины определены рабочими учебными планами, учебными программами, в которых приведено подробное описание материала. Обычно дается также распределение учебного времени по формам занятий (лекции, семинары и т.д.).

В ДК основной содержательно-организационной единицей становится *тема*. Если в традиционных формах организации обучения тема – это часть содержания, то в ДК это и фрагмент содержания, и аналог занятия. По этой причине в дистанционном обучении должно регламентироваться не количество аудиторных часов, а объем материала.

Анализ существующих дистанционных курсов с точки зрения требований к объему материала в сопоставлении с плановой трудоемкостью показывает, что оптимальное соотношение количества тем и общего объема курса (в часах) – в среднем 1 до 5. Иными словами, если курс имеет общий объем 1 кредит (30 час), то его объем в дистанционной форме будет составлять 11-15 тем (может быть и меньше). Это усредненный показатель, который не исключает вариации в пределах конкретного курса, обусловленные как спецификой содержания, так и другими параметрами. Сам процесс разработки дистанционного курса можно разделить на две составляющих: *разработка учебно-методического наполнения и дизайн курса*. На первом этапе проводится структурирование текстов, логическое построение их частей, проектирование структуры понятийного аппарата и инструментальной части курса – контроля, обсуждений и тому подобное. Очень важно при этом планирование структуры курса, то есть системы ссылок и переходов между понятиями, содержательной и инструментальной компонентами. После этого проводится создание и размещение материалов в электронном виде, формирование системы

переходов и ссылок, реализация контроля и т.д. Учебно-методическое и информационное обеспечение включает необходимое количество литературы, учебных и наглядных пособий, тексты лекций и примеры решения типовых задач на бумажных и электронных носителях; учебно-методическую документацию по организации различных видов самостоятельной работы; необходимое количество вариантов заданий и методических рекомендаций по их выполнению.

Роль преподавателей высшей школы сегодня радикально изменилась – они должны быть навигатором по миру искомого учебного материала, потому что преподаватель сегодня менее информативен, чем, например, научные сайты типа Google и др. Студенты могут войти в любой научный образовательный сайт и увидеть, что по этому поводу написали и какие мнения высказали еще множество специалистов – может быть, спорные и противоречивые суждения. Преподаватель должен нацелить студента на поиск новых методических и технологических подходов при решении задач, должен обладать умением убедить студента получать максимум, но за счет собственного познания, т.е. использование современных технологий в обучении требует активизации процесса познания.

Комплект **учебно-методических материалов ДК** (дистанционного курса) должен разрабатываться в соответствии со следующими принципами:

1. **Программа** должна содержать формулирования целей как компоненты учебного процесса по данной дисциплине, формировать мотивации успешного изучения курса с помощью разъяснения его места и значения в системе обучения. **Учебные материалы** в цифровой форме должны удовлетворять требованию простоты ориентации студентов при перемещении по ссылкам. В предисловии к учебным материалам необходимо объяснить условные обозначения ссылок и дать рекомендации относительно рациональных приемов навигации.

2. **ДК** должен предусматривать общение студентов с преподавателем и между собой. **ДК** не является электронной копией печатных учебников или простым компьютерным учебником. Информационно-коммуникационные технологии (не являясь самоцелью) могут и должны эффективно использоваться для достижения целей учебного процесса.

Процесс создания **ДК** требует от преподавателей-авторов знаний как в предметной области, для которой создается **ДК**, так и в области информационных технологий, что на практике чаще всего предполагает сотрудничество двух специалистов: *преподавателя-практика*, ответственного за содержание курса (автор курса), и *методиста-консультанта*, который владеет информационными технологиями (инженер по знаниям). Для создания учебно-методических материалов преподавателю рекомендуется использовать специальные документы, регламентирующие процесс разработки дистанционных курсов, и описание инструментария среды обучения, а также необходимо предварительно ознакомиться с

существующими курсами и учебными программами не только в своей предметной области, но и в иных областях, обратив особое внимание на аудио- и видео фрагменты, способы визуализации формул, графиков и т.п. Главное здесь – сами способы передачи знаний студенту, а не то, как их программно реализовать. Общая работа преподавателя-практика и специалиста по информационным технологиям позволяет не только создать фрагменты содержания, готовые для дальнейшего воплощения программистами и дизайнерами, но и, что очень важно, подготовить сценарий взаимодействия отдельных частей курса и сценариев аудио- и видео приложений.

Разработка качественного дистанционного курса – это длительный и дорогостоящий процесс, поэтому важно хорошо представлять себе его этапы и возможные принимаемые решения. Рекомендуемые, на наш взгляд, этапы разработки учебно-методического наполнения ДК следующие:

- изучение и анализ проблемы;
- определение целей и функций курса;
- определение состава и структуры курса, разработка сценария обучения;
- разработка модулей;
- документирование содержания курса;
- оценка курса

На этапе изучения и анализа проблемы необходимо в общих чертах определить *учебную проблему*, которую должен решить дистанционный курс, и организационные действия, необходимые для обеспечения эффективной работы.

Учебная проблема при создании дистанционного курса определяется соответственно ранее разработанному *учебному плану* по всей дисциплине (желательно, чтобы еще к началу этого этапа была проанализирована заданная нормативными документами программа дисциплины).

Должны быть выявлены и изучены уже существующие курсы по данной дисциплине, определены прогнозируемые затраты и время, необходимые для создания курса, а также его возможная аудитория и т. п., что позволяет определить общие требования к курсу. Общеобразовательные курсы должны учитывать особенности обучения, связанные с разнообразным уровнем общей подготовки студентов и уровнем их компьютерных знаний, что может потребовать введения предварительного тестирования и адаптации курса для оптимизации плана преподавания учебного материала.

Необходимо также определиться с тем, какие требования предъявляются к курсу, какую степень интерактивности нужно создать, какова новизна информации, предлагаемой студентам для освоения. От этого зависит время и стоимость разработки курса. Организационные действия содержат в себе формирование авторского коллектива, решение финансо-

вых вопросов, определение рецензентов по предметной области и т.д., при этом необходимо четко определить для кого предназначен курс и для чего он предназначен (какие знания, умения и навыки необходимо приобрести). Таким образом определяется кого и чему учить.

Контингент определяется такими параметрами:

1. Объекты будущей профессиональной деятельности;
2. Виды будущей профессиональной деятельности;
3. Возраст;
4. Уровень образования.

Дистанционная технология предполагает высокую определенность и однозначность, поэтому формулирование целей должно отвечать в первую очередь требованиям диагностичности и инструментальности, т. е. они должны быть легко проверяемы с помощью достаточно простых контрольных мероприятий.

На этом этапе проходит определение точного перечня всего материала, который должен быть изложен в данном курсе, отбор официально принятых и доступных учебников, учебных пособий, справочников и т.д. В случае, если педагог преподает данную дисциплину «традиционными методами», у него уже есть какой курс лекций, учебников и иных пособий, которые ему предлагается использовать в дальнейшем при разработке дистанционного курса.

Определение **состава и структуры** курса, разработка общего сценария обучения – для каждого модуля необходимо определить, какую цель планируется достичь и как проверить ее достижение, в чем состоит важность конкретного модуля. Иногда желательно также определить, какие задачи не планируется решать в данном модуле. На этом этапе необходимо очертить состав учебных материалов каждого модуля и сформировать общий сценарий обучения по курсу, описав стратегии управления учебными действиями на уровне модулей. Таким образом решается вопрос как учить.

Фрагментарность и психологические особенности контактов преподавателя и студента в ДК диктуют необходимость иного подхода к структурированию учебного материала. Основной структурной единицей ДК нами предлагается выбрать модуль, который имеет цели, достижение которых обязательно проверяется с помощью выходного контроля.

Достижение целей возможно только при определенном стартовом уровне знаний и умений студентов. Особенностью методологии учебного процесса, построенного на модульной структуре, есть его технологичность, состоящая в том, что, если студент прошел входной контроль в модуль, то при выполнении всей технологии, которая обеспечивает учебный процесс, ему гарантируется достижение целей модуля.

Модуль является достаточно самостоятельной структурной единицей, но практически всегда важна последовательность прохождения модулей. Иногда в курсе предусматривается возможность пропуска определенного модуля, исходя из предыдущих результатов обучения или

результатов тестового контролю, гарантирующих наличие у студента знаний и умений, достижению которых посвящен этот модуль.

Модуль, как правило, должен состоять из нескольких тем, каждая с которых должна быть логически завершенной. Даже если необходимый материал невозможно поместить в одну тему, делить его нужно так, чтобы *подтемы* были логически обоснованы, и каждой из них можно было бы дать свой заголовок. Каждая тема должна содержать примерно равное количество новых дидактических единиц, чем обеспечивается равномерность загрузки студента на протяжении учебного процесса.

На этом этапе целесообразно разработать концептуальные схемы курса, их должно быть, как минимум две: общая схема курса – то, как все элементы курса связаны вместе, и схема взаимодействия между студентами, курсом и преподавателем. Иерархическая структура курса состоит из модулей, тем и подтем. Каждому модулю и теме необходимо присвоить наименования таким образом, чтобы их можно было изобразить в виде иерархической схемы: высший уровень – модули, второй уровень – темы, третий уровень – подтемы.

Схема взаимодействия между студентом, компонентами курса и преподавателем определяет общий сценарий обучения по данному курсу. На этом этапе предусматривается написание текста каждого модуля курса, отбор иллюстративного и справочного материала, создание эскизов интерфейса и сценария обучения, а также сценариев отдельных анимационных фрагментов, видеофрагментов и т.п.

На протяжении всего этапа нужно помнить такие особенности: материал в темах должен быть хорошо структурированным и представлять собой законченные фрагменты текста с определенным обоснованным числом новых понятий (традиционное требование к любому печатному или компьютерному учебнику, но для дистанционного курса оно становится решающим).

Параллельно с написанием текста проводится работа над сценарием мультимедиа – составной частью каждой темы модуля. Написание сценария должно идти с учетом возможностей выбранного программного обеспечения и имеющихся материалов. Полный сценарий модуля включает использование обычного текста со ссылками на связанные темы или понятия, на изображение, видеофрагменты, иллюстративного материала (таблиц, графиков, схем), аудио- и видеофрагментов и т.п.

После композиции материала отдельных тем проводится сплошное редактирование текста, чтобы привести в него концептуальное и стилистическое единство, при этом авторы еще могут дописать отдельные фрагменты, внести дополнительные поправки и уточнения. Контрольный этап состоит в том, что просматривается текст целиком, чтобы определить, выдержаны ли общие требования к изложению материала, не пропущены какие-нибудь темы и т.п.

Все контрольные мероприятия курса базируются на том, что каждый модуль имеет цель, достижение которой проверяется, а тема педагогически и методически завершена. Таким образом, студент проходит через полный цикл процесса усвоения – от первичного восприятия содержания к закреплению усвоенной информации.

Определенные контрольные мероприятия обязательны для каждого модуля в целом и рекомендуются к каждой теме. Некоторые из них определяются как именно контрольные (текущий, рубежный, итоговый контроль), а некоторые несут на себе контрольную функцию, но определяются как участие в семинарах, практических занятиях и тому подобное. В рейтинговой системе успеваемости оценка за итоговое мероприятие не становится оценкой по всему курсу. Если упор сделать на текущем контроле, задачах, контрольных работах, то комплексная оценка студента будет более адекватной реальному уровню освоения курса.

Итоговый анализ результатов проведенных исследований показал, что рейтинг как педагогическое условие является одним из ведущих мотивационных факторов в активизации учебной деятельности студентов. Использование рейтинговой системы позволило, на наш взгляд, прежде всего, правильно спланировать самостоятельную работу, определить ее формы и методы.

Кроме этого, важное значение имеет систематический контроль за выполнением обучающимся заданий по самостоятельной работе, при этом происходит повышение их уровня активности на протяжении всего периода обучения.

Основываясь на результатах предыдущих этапов, необходимо сформировать документ, в который входят структурная модель курса и состав всех ее элементов. Результатом данного этапа есть полное описание каждого модуля и курса в целом в заранее определенном формате.

После того, как работа выполнена, и документ окончательно подготовлен и подписан его авторами, он проходит экспертизу, которая осуществляется группой, состоящей из высококвалифицированных специалистов в данной предметной области, методистов и специалистов по информационным технологиям. Если экспертиза признает методическое наполнение курса удовлетворительным, оно передается дизайнерам и программистам.

Необходимо подчеркнуть, что на протяжении всей дальнейшей работы до момента полной готовности дистанционного курса преподаватели продолжают участвовать в технологическом процессе как консультанты и эксперты.

**Выводы.** В заключение отметим, что, несмотря на отсутствие достаточной нормативной-правовой поддержки дистанционного обучения в высшей школе, многими отечественными коллективами ведутся активные работы в этой области.



Дальнейшее развитие дистанционного обучения в высшей школе, по нашему мнению, требует формирования единой информационной образовательной среды. Для этого, очевидно, с учетом мирового опыта необходимо пойти по пути создания набора национальных стандартов, архивов общедоступных учебных материалов, тесно связанных с регулированием в области системы высшего образования в Украине

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бредньова В.П., Бредньов А.М. Про створення контрольних модулів дистанційного навчання при вивченні графічних дисциплін // Матер. XVI Міжнар. наук.-метод. конф. «Управління якістю підготовки фахівців». – Одеса: ОДАБА, 2011. – Ч.1. – С. 25.
2. Бредньова В.П., Бредньов А.М. Про принципи модульного підходу у сучасній освіті // Матер. XVIII Міжнар. наук.-метод. конф. «Управління якістю підготовки фахівців». – Одеса: ОДАБА, 2013. – Ч. 1. – С.88-90.
3. Bredneva V., Kosharskaya L., Linetskaya A. Drawing training of students – main basis engineers' education // Вісник Одеського національного морського університету (ОНМУ). – Одеса: Вид.-во ОНМУ, 2016. – № 3(49). – С. 152-157.
4. Бреднёва В.П., Кошарская Л.В. О формировании профессиональных компетенций будущих инженеров в процессе изучения графических дисциплин в вузе // Вісник Одеського національного морського університету (ОНМУ). – Одеса: Вид.-во ОНМУ, 2017. – № 2 (51). – С.188-193.

*Стаття надійшла до редакції 20.10.2017*

#### **Рецензенти:**

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Підприємництво» Одеського національного морського університету  
**Г.С. Махуренко**

кандидат технічних наук, професор кафедри Нарисна геометрія та інженерна графіка Одеської державної академії будівництва та архітектури  
**В.С. Марченко**

**Блажко Анатолій Петрович** – доцент кафедри Гідротехнічного будівництва Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Бредньова Віра Петрівна** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Нарисна геометрія та інженерна графіка» Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Бурдун Євген Тимофійович** – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри Проектування та виробництво конструкцій із композиційних матеріалів Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

**Вишневська Ольга Дмитрівна** – старший викладач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Григорян Тигран Георгійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Управління проектами» Миколаївського Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

**Данілян Анатолій Григорович** – старший викладач кафедри Судноводіння і енергетики суден Національного університету «Одеська морська академія», механік першого розряду

**Демідюк Олександр Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету

**Дрожжин Олексій Леонідович** – асистент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Єгоров Олександр Геннадійович** – старший науковий співпрацівник Морського інженерного бюро, м. Одеса

**Єгоров Геннадій В'ячеславович** – доктор технічних наук, професор, генеральний директор Морського інженерного бюро, м. Одеса

**Кобзарук Олександр Васильович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія матеріалів» Одеського національного морського університету

**Колесник Дмитро Валентинович** – перший заступник керівника групи електромеханічного відділу Морського інженерного бюро, м. Одеса

**Кошарська Людмила Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету

**Леонтєва Анна Ігорівна** – аспірант кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Літвіненко Дмитрій Юрійович** – провідний інженер кафедри Будівельної механіки та конструкцій корпусу корабля Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

**Лукаш Ернест Павлович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету

**Мурад'ян Арсен Олегович** – асистент кафедри «Експлуатація морських портів» Одеського національного морського університету

**Нільва Олександр Єфимович** – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Морського Інженерного бюро, м. Одеса

**Онищенко Світлана Петрівна** – доктор економічних наук, професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Панченко Тетяна Дмитрівна** – в.о. асистента кафедри «Технічна кібернетика ім. проф. Р.В. Меркта» Одеського національного морського університету

**Партолога Майя Іванівна** – ст. наук. співпрацівник кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету

**Пітерська Варвара Михайлівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Комерційне забезпечення транспортних процесів» Одеського національного морського університету

**Присташ Світлана Федорівна** – ведучий спеціаліст факультету Морської інфраструктури, викладач кафедри Морського приладобудування Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

**Сабуров Олександр Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, начальник морехідного училища ім. О. Марінеско

**Смажило Богдан Васильович** – доцент кафедри «Технологія матеріалів» Одеського національного морського університету

**Стародуб Валерій Іванович** – старший викладач кафедри «Технічна кібернетика ім. проф. Р.В. Меркта» Одеського національного морського університету

**Титов Сергій Дмитрович** – доцент кафедри «Вища математика» Миколаївського Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

**Тошюк Валерій Іванович** – технічний директор Морського Інженерного бюро, м. Одеса

**Тузова Ірина Анатоліївна** – старший викладач кафедри «Технічна кібернетика ім. проф. Р.В. Меркта» Одеського національного морського університету

**Челабчі Віктор Миколайович** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Технічна кібернетика ім. проф. Р.В. Меркта» Одеського національного морського університету

**Челабчі Володимир Вікторович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Технічна кібернетика ім. проф. Р.В. Меркта» Одеського національного морського університету

**Чернова Людмила Сергіївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційних управляючих систем і технологій Миколаївського Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

**Чимшир Валентин Іванович** – кандидат технічних наук, директор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Щербина Ольга Василівна** – асистент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

*Наукове видання*

# **ВІСНИК ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**Збірник наукових праць**

**Випуск 4 (53)**

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською, російською  
та англійською мовами*

Видається з червня 1997 р.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 4242 від 26.12.2011 р.

---

Підписано до друку з оригінал-макету 10.11.2017.  
Формат 70x108/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 16,4.  
Замовлення № 178.

Надруковано у Видавництві ОНМУ  
65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.  
Тел. 728 31 14