

# ВІСНИК

ОДЕСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО  
МОРСЬКОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ

39

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



**ВІСНИК  
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

*Збірник наукових праць*

**ВИПУСК 3(39)**

*Заснований у червні 1997 року*

Одеса – 2013

ОДЕСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК  
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

№ 3(39)  
2013

Заснований у червні 1997 року

Виходить 4 рази на рік

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

УДК 629.12.002(082)

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

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

**Редакційна колегія:**

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

д-р техн. наук, проф.	<i>Вассерман О.А.</i>	д-р економ. наук, проф.	<i>Ланкіна І.О.</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Гришин В.О.</i>	д-р фіз.-мат. наук, проф.	<i>Андронов І.І.</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>Євдокімов В.Д.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Івановський В.Г.</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Іванченко О.О.</i>	д-р техн. наук	<i>Дульнев О.І.</i>
	<i>(Росія)</i>		<i>(Росія)</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Руденко С.В.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Козляков В.В.</i>
д-р техн. наук, проф.	<i>Дубровський М.П.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Сизов В.Г.</i>
д-р економ. наук, проф.	<i>Махуренко Г.С.</i>	д-р техн. наук, проф.	<i>Яровенко В.О.</i>

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Одеського національного морського університету  
(протокол № 4 від 27 листопада 2013 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.

## ЗМІСТ

### ТЕОРІЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ КОРАБЛЯ

<b>Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Тонюк В.И., Автутов Н.В.</b> Обоснование параметрического ряда многофункциональных судов-спасателей гражданского назначения .....	5
<b>Егоров А.Г.</b> Определение главных размерений барже-буксирного состава смешанного плавания «ДНЕПРО-МАКС» класса .....	37
<b>Тарасенко Т.В.</b> Определение сопротивления движению судна при движении на волнении с учетом курсового угла .....	62

### БУДІВЕЛЬНА МЕХАНІКА, МІЦНІСТЬ СУДЕН ТА СПОРУД

<b>Гришин В.А.</b> Морские искусственные острова. Ч.3 .....	72
<b>Коноплев А.В.</b> Влияние выбора модели кривой усталости на сумму накопленных повреждений при нерегулярном режиме нагружения .....	83
<b>Войтенко И.В.</b> Строительство портовых сооружений в условиях прочностной анизотропии грунтовых оснований .....	90
<b>Нильва В.А.</b> Оценка несущей способности корпуса сухогрузного судна смешанного плавания при потере части продольных связей .....	96
<b>Гришин В.А., Гришин А.В.</b> Математическое моделирование склонов (1) .....	109
<b>Гришин В.А., Гришин А.В.</b> Математическое моделирование склонов (2) .....	131
<b>Кобзарук А.В., Сабуров А.И., Смажило Б.В.</b> Исследование сопротивления малоцикловой усталости конструкционной судостроительной стали в зависимости от частоты и формы нагружения .....	149

## ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<b>Никитин Е.В.</b> Устойчивость двухзвенной системы подвешивания груза с параллельными стропами вторичного подвеса .....	156
<b>Стрельцов П.М.</b> Оптимальное управление самоходными талями .....	168
<b>Демешкан И.А., Голиков А.А.</b> Исследование особенностей мойки танков на современном танкере-химовозе с целью оптимизации данного процесса .....	181
<b>Вычужанин В.В., Рудниченко Н.Д.</b> Концепция анализа и оценки риска судовой сложной технической системы .....	187
<b>Демешкан И.А., Голиков А.А.</b> Исследование экологической составляющей в процессе мойки танков .....	194

## УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ

<b>Руденко С.В., Ма Фен</b> Аспекты практики реализации проекта формирования имиджа учебного заведения .....	199
<b>Кириллова Е.В.</b> Управление работой судна и судовой менеджмент: этимология понятий, генезис развития теории и практики .....	210
<b>Колесникова Е.В.</b> Теория проектного управления: закон контроля параметров риска .....	220
<b>Руденко Е.С.</b> Идентификация и классификация факторов опасности на объектах портовой инфраструктуры .....	233
<b>Мурадян А.О.</b> Обґрунтування підходу до постановки завдання управління взаємодією суміжних підприємств мультимодальних транспортно-логістичних вузлів .....	241
<b>Вишне夫斯基 Д.О.</b> Формирование схем движения судов и расстановка флота в линейном судоходстве .....	256
<b>АВТОРИ ЗБІРНИКА</b> .....	263

УДК 629.12

Г.В. Егоров, И.А. Ильницкий, В.И. Тонюк, Н.В. Автугов

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЯДА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СУДОВ-СПАСАТЕЛЕЙ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*На основании исследований 2008-2012 годов, проведенных Морским Инженерным Бюро, а также используя результаты работ ЦНИИ морского флота, ПКБ «Агат дизайн», ОАО «Завод Нижегородский теплоход») обоснована «сетка» современных аварийно-спасательных судов для обеспечения АСГ, включая требования к каждому типу судна, его главным характеристикам и решению внешней задачи проектирования. Такая «сетка» была привязана к условиям Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** проектирование, многофункциональное аварийно-спасательное судно, определение главных характеристик, параметрический ряд перспективных судов, функции спасательных судов.

*На підставі досліджень 2008-2012 років, які були проведені Морським Інженерним Бюро, а також з використанням результатів робіт ЦНДІ морського флоту, ПКБ «Агат Дизайн», ВАТ «Завод Нижегородський теплоход», обґрунтовано «сітку» сучасних аварійно-рятувальних суден для забезпечення АРГ, включаючи вимоги до кожного типу судна, його головних характеристик та рішення зовнішнього завдання проектування. Така «сітка» була прив'язана до умов Російської Федерації.*

**Ключові слова:** проектування, багатофункціональне аварійно-рятувальне судно, визначення головних характеристик, параметричний ряд перспективних суден, функції рятувальних суден.

*On the basis of researches of the 2008-2012 which have been carried out by the Marine Engineering Bureau, and also using results of works (CNII of Marine Fleet, Design Bureau «Agat design», public-stock company «Zavod Nizhegorodskiy teplohod») the «grid» of modern salvage vessels for maintenance of emergency salvage duty, including requirements to every type of vessels, its main characteristics and the solution of an outer problem of designing is proved. Such «grid» was connected to conditions of the Russian Federation.*

**Keywords:** designing, multipurpose salvage vessel, definition of the main characteristics, parametrical line of perspective vessels, functions of salvage vessels.

**Постановка проблемы.** Морской транспорт является зоной деятельности человека с повышенным риском для его здоровья и жизни. Поэтому наличие специального флота, обеспечивающего аварийно-спасательную готовность (АСГ) государства на прилегающих к его территории морских акваториях регламентируется международными обязательствами и внутренним законодательством страны.

Большинство отечественных судов для АСГ, находящихся в эксплуатации, построены до 1991 года. К концу первого десятилетия нового века потребность в обновлении спасательного флота стала насущной. В качестве доказательства этого тезиса можно привести пример трагических событий ноября 2007 года, когда спасение людей на гибнущих судах осуществлял обычный буксир частной украинской компании.

Походы к проектированию судов для АСГ были изложены в публикациях [1, 3, 8, 10], которые к настоящему времени значительно устарели (изменились общие компоновочные решения, существенно отличается оборудование, усложнились функции и их комбинации на отдельно взятом судне, стал широко применяться подход к созданию многофункционального судна, когда на единой платформе спасатель выполняет работы в широчайшем спектре – от обычных для этого типа, до водолазных и ледокольных). Книги [7, 9] были посвящены различным аспектам эксплуатации судов для АСГ и не содержат рекомендаций к проектированию.

**Целью** статьи является (на основании исследований 2008-2012 годов, проведенных Морским Инженерным Бюро [5, 6], а также используя результаты работ ЦНИИ морского флота [2], ПКБ «Агат дизайн», ОАО «Завод Нижегородский теплоход») обосновать «сетку» современных аварийно-спасательных судов для обеспечения АСГ, включая требования к каждому типу судна, его главные характеристики и решение внешней задачи проектирования. Такая «сетка» были привязана к условиям Российской Федерации.

**Изложение основного материала.** Система аварийно-спасательного обеспечения судоходства в Российской Федерации включает в себя комплекс сил средств по ликвидации последствий аварийных разливов нефти и выполнению аварийно-спасательных операций в морских портах и на подходах к ним.

Задачи проведения поисковых, спасательных и буксирных операций; подъема затонувших в море судов и имущества; проведения гидротехнических, подводно-технических и других водолазных работ; защиты и сохранения морской среды, экологического контроля согласно Кодекса торгового мореплавания РФ возложены на Министерство транспорта РФ. В свою очередь в Федеральном Агентстве морского и речного транспорта (Росморречфлот) функции аварийно-спасательного обеспечения на морском транспорте и координации работ в этой области переданы ФБУ «Госморспасслужба России».

ФБУ «Госморспасслужба России» и подведомственные ему бассейновые филиалы ФБУ «Морская спасательная служба» (ранее более известные как бассейновые аварийно-спасательные управления или БАСУ) и другие организации, образуют системную основу сил и средств функциональных подсистем Росморречфлота, которые входят в Единую государственную систему предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Число аварийных случаев в зоне ответственности России остается значительным (см. таблицу 1).

*Таблица 1*

*Статистика по аварийным случаям*

	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
Число аварийных случаев в морских поисково-спасательных районах Российской Федерации	182	234	255	305	195
Спасено людей в ходе проведения поисково-спасательных операций	335	315	413	421	489

*Источник: ФБУ «Госморспасслужба России»*

Основное место в данной системе занимают специализированные суда аварийно-спасательного флота.

В настоящее время суда для несения АСГ находятся как в государственной, так и частной собственности. Спасательные суда, находящиеся в государственной собственности, сосредоточены в аварийно-спасательных формированиях системы Госморспасслужбы России (см. таблицу 2).

*Таблица 2*

*Суда для несения АСГ из состава флота ФБУ  
«Госморспасслужба России»*

Номер n/n	Бассейн	Группы спасательных судов (катеров)	Действующий состав флота	Необходимый состав флота
1	2	3	4	5
1.	Балтийский	Спасательное судно	3	4
		Спасательный катер		4
		Спасательный катер на воздушной подушке		3
		Морское водолазное судно	3	2
		Рейдовый водолазный катер	5	6
		Нефтесборное судно	6	6
		Судно-бонопостановщик	2	6
	Спасательный катер-бонопостановщик	5	7	
	ИТОГО:		24	38

*Продолжение табл. 2*

1	2	3	4	5
2.	Север- ный и Запад- ная часть Аркти- ческого бассейна	Спасательное судно	2	6
		Спасательный катер	1	3
		Спасательный катер на воздушной подушке		2
		Морское водолазное судно	1	2
		Рейдовый водолазный катер	4	4
		Нефтесборное судно	4	4
		Судно- бонопостановщик	2	4
		Спасательный катер-бонопостановщик	2	5
	ИТОГО:		16	30
3.	Тихо- океан- ский и Восточ- ная часть Аркти- ческого бассейна	Спасательное судно	3	10
		Спасательный катер		5
		Спасательный катер на воздушной подушке		3
		Морское водолазное судно	1	3
		Рейдовый водолазный катер	2	4
		Нефтесборное судно	1	5
		Судно- бонопостановщик	2	5
	Спасательный катер-бонопостановщик	1	8	
ИТОГО:		10	43	
4.	Дальне- восточ- ный	Спасательное судно	3	3
		Спасательный катер		4
		Спасательный катер на воздушной подушке		1
		Морское водолазное судно		2
		Рейдовый водолазный катер	3	3
		Нефтесборное судно	1	3
		Судно- бонопостановщик	1	4
	Спасательный катер-бонопостановщик		4	
ИТОГО:		8	24	

*Продолжение табл. 2*

1	2	3	4	5
5.	Азово-Черноморский	Спасательное судно	2	4
		Спасательный катер		5
		Спасательный катер на воздушной подушке	1	3
		Морское водолазное судно	2	3
		Рейдовый водолазный катер	5	6
		Нефтесборное судно	1	4
		Судно-бонопостановщик	5	4
		Спасательный катер-бонопостановщик	5	8
	ИТОГО:		21	37
6.	Каспийский	Спасательное судно	1	2
		Спасательный катер		3
		Спасательный катер на воздушной подушке		2
		Морское водолазное судно	1	2
		Рейдовый водолазный катер	2	3
		Нефтесборное судно	4	4
		Судно-бонопостановщик	1	2
		Спасательный катер-бонопостановщик	2	4
	ИТОГО:		11	22
	ВСЕГО:		90	194

*Источник: ФБУ «Госморспасслужба России»*

Данные по флоту соответствуют состоянию на начало 2013 года. Учтены разработанные ЗАО «ЦНИИМФ» нормативы оснащения АСФ спасательными судами на морских бассейнах.

Суда для несения АСГ по морским бассейнам распределялись следующим образом:

- в Северном бассейне в эксплуатации находились 16 судов (и еще 11 судов у других ведомств и организаций);
- в Балтийском бассейне – 24 судна (плюс 19 судов во взаимодействии);

- в Дальневосточном бассейне – 8 судов (плюс 20 судов во взаимодействии);

- в Черноморско-Азовском бассейне – 21 судно (плюс 42 судна во взаимодействии);

- в Каспийском бассейне – 11 судов (плюс 8 судов во взаимодействии).

Средний возраст судов, находящихся в государственной собственности, составлял (без учета вновь построенных) 25,8 лет, а средний возраст аварийно-спасательных судов частных компаний на тот же период – 15,2 года.

Дальнейшая эксплуатация судов с таким сроком службы сопряжена со значительными затратами на текущее содержание, техническое обслуживание и ремонт, с увеличением риска аварийных происшествий и заметным моральным старением оборудования и самих концептов судов. В подобной ситуации единственным выходом является строительство новых судов для обеспечения аварийно-спасательной готовности (АСГ).

Анализ характеристик существующих спасательных судов и фактически выполняемых ими функций в России и других странах, а также современных аналогов показывает, что общей тенденцией является строительство многофункциональных спасательных судов (МСС) и повышение мощности энергетической установки.

Такие МСС должны быть хорошо приспособлены для выполнения следующих функций:

- патрулирование, аварийно-спасательное дежурство в районах интенсивного судоходства, рыбного промысла, морских нефтяных и газовых промыслов;

- поиск, спасение, эвакуация и размещение людей, оказание им медицинской помощи;

- снятие с мели и рифов аварийных судов, откачка воды из затопленных отсеков;

- буксировка аварийных судов и объектов к месту убежищ, а также выполнение морских буксировок судов, плавучих объектов и сооружений во льдах и на чистой воде, оказание помощи судам и выполнение спасательных работ в ледовых условиях и на чистой воде;

- оказание помощи в тушении пожаров на плавучих и береговых объектах, доступных для подхода с моря;

- тыловое и техническое обеспечение, в том числе выполнение подводно-технических работ водолазов;

- тушение горящего на воде топлива, ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (ЛАРН);

- освидетельствование и очистка подводной части корпуса судов, плавучих и береговых объектов.

Основными факторами, определяющими успешное выполнение всего спектра аварийно-спасательных работ являются достаточные ледопробиваемость, ходкость на чистой воде, мореходность.

Наличие сложного сочетания функций приводит к взаимно противоречивым тенденциям в выборе обводов, главных размерений и других свойств МСС. Например, при выборе пропульсивного комплекса одновременно необходимо выполнить условия по пяти возможным режимам эксплуатации:

- переход с эксплуатационной скоростью (примерно 70 % от полного хода), характерный для нахождения в заданном районе и для обычных переходов судна;

- режим полного хода при выходе на спасение – достижение высокой скорости свободного хода, что обеспечивает снижение времени подхода к аварийному судну;

- буксировка плавучих объектов – обеспечение необходимой тяги на гаке при выполнении буксировочных операций;

- обеспечение достаточного упора для стягивания аварийного судна с мели;

- эксплуатация во льдах, в том числе обеспечение ледокольных функций, для судов ледового плавания обеспечение требуемой мощности по Правилам РС в соответствии с выбранной ледовой категорией судна.

С учетом того, что для судов с высокими ледовыми свойствами применение винтов регулируемого шага не рекомендуется, понятно, что оптимальное решение этой задачи для всех четырех режимов невозможно. Практический подход состоит в поиске «золотой середины» – компромиссного решения.

Форма корпуса судов ледового плавания является компромиссом между двумя противоречивыми требованиями – ледопроеходимостью и ходкостью на чистой воде. Соответствующий баланс между ними определяется приоритетом миссии судна. Следует иметь в виду, что обычной платой за ледопроежимость являются недостаточная мореходность и увеличение сопротивления движения судну. Например, в значительной мере это распространяется на МСС – ледоколы мощностью 7 МВт, которые значительную часть эксплуатационного времени будут плавать в условиях чистой воды.

Более широкий спектр работ многофункциональных спасательных судов в сравнении со специализированными ледоколами **принципиально меняет** подход к выбору формы корпуса. Поскольку, кроме выполнения ледокольных операций спасательные суда, прежде всего, должны работать согласно основному назначению, для них не могут быть рекомендованы обводы традиционного ледокольного типа. Наиболее предпочтительным является компромиссный вариант обводов, обеспечивающий требуемый уровень ходовых качеств судна, как в ледовых условиях, так и на чистой воде.

При этом следует учитывать ограничения по осадке, которые актуальны для значительной части морских акваторий страны.

Так, в соответствии с Реестром морских портов России из 66 морских портов 23 порта имеют ограничения по осадке судов до 5 метров. В

указанных портах большая часть причалов имеют глубины в районе 3,0-3,2 м. Распределение морских портов с «ограниченной осадкой» по морским бассейнам следующее:

- Южный бассейн – 11 портов;
- Дальневосточный бассейн – 6 портов;
- Арктический бассейн – 6 портов.

Эти данные свидетельствуют, что в 35 % российских портов невозможно осуществление аварийно-спасательных работ без наличия многофункциональных судов с ограниченной осадкой.

Они необходимы для обеспечения подходов к следующим портам:

- в Черном море – порты Кавказа;
- в Азовском море – Керченский пролив, Таганрогский залив, а также в морской части Волго-Донского судоходного канала (порты Азов и Ростов-на-Дону), порт Темрюк;
- в Каспийском море – район порта Махачкалы, Волго-Каспийский канал, порт Оля, порт Астрахань;
- в Балтийском море – восточная часть Финского залива (Выборг, Сайменский канал), Калининградский залив;
- порты восточного побережья Камчатки, включая Анадырский залив.

Кроме того, при нахождении спасаемого судна на мели, МСС желательно иметь минимальную осадку, тогда МСС сможет ближе подойти к объекту, а в некоторых случаях – обойти аварийное судно за бровкой глубоководного фарватера.

Понятно, что для судов с ограниченной осадкой скорость свободного хода и тяга движителей ограничивается условием полной переработки мощности главных двигателей, что, в свою очередь, определяется ограничением диаметра гребных винтов для предотвращения их аэрации и кавитации.

Выбор мощности судна из условия стягивания с мели аварийного судна затруднителен, так как, даже располагая размерами аварийного судна, из-за многообразия условий посадки на мель трудно расчетным методом определить потерю плавучести судна и давление судна на грунт, от которых зависит величина стягивающего усилия. Кроме этого, на величину стягивающего усилия может оказывать влияние и выбранная тактика снятия судна с мели (частичная или полная разгрузка судна, откачка балласта и запасов, изменение дифферента и крена судна, заделка пробоины, подача в поврежденные отсеки сжатого воздуха, применение кранов большой грузоподъемности и т.п.).

Поэтому в сложившейся практике проектирования при определении мощности МСС исходят из мощности, необходимой для буксировки выбранного расчетного объекта или аварийного судна при заданной скорости буксировки (наряду с требованиями к достаточной ледопроеходимости и скорости на чистой воде).

Скорость свободного хода МСС должна быть не менее 13-15 узлов.

Именно многообразии условий плавания, ледовых условий, глубин в каждом конкретном месте несения АСГ приводит к созданию концептов с различными главными параметрами (главные характеристики «линейки» даны в таблице 3, боковые виды – в таблице 4):

1. Морское многофункциональное аварийно-спасательное судно – ледокол мощностью 7 МВт для самостоятельной работы в сплошном ледяном поле толщиной около 1 м с неограниченным районом плавания, с возможностью выполнения ледокольных операций при толщине льда до 1,5 м, с осадкой около 6-6,5 м для Северного морского пути и Дальневосточного бассейна (проект MPSV06).

Предполагалось строительство 4 единиц на замену буксиром-спасателям проекта 1454, 2262, буксиром-снабженцам проекта В-92/1, постройки 1983-1985 годов.

2. Морское многофункциональное аварийно-спасательное судно мощностью 4 МВт с высоким ледовым классом Arc5 для самостоятельной работы в сплошном ледяном поле толщиной около 0,5 м, с неограниченным районом плавания, с возможностью плавания в канале за ледоколом в среднем однолетнем льду толщиной до 1,2 м, с осадкой около 4,5-5 м для Балтийского и Черного морей (проект MPSV07).

Головное судно сдано в ноябре 2012 года, два сдаются, четвертое строится (на замену буксиром-спасателям проекта 1454, 2262, буксиром-снабженцам проекта В-92/1).

3. Морское многофункциональное аварийно-спасательное судно мощностью около 2 МВт с неограниченным районом плавания, с осадкой около 5 м для незамерзающих акваторий (проект MPSV09).

Предполагается строительство 2 единиц на замену буксиром-спасателям проекта 1454, буксиром-снабженцам проекта В-92/1 постройки 1983-1985 годов.

4. Морское многофункциональное аварийно-спасательное судно мощностью около 3 МВт с высоким ледовым классом Arc4 для самостоятельной работы в разреженных тонких однолетних льдах толщиной до 0,7 м в зимне-весеннюю навигацию и до 0,9 м в летне-осеннюю навигацию, с неограниченным районом плавания, с осадкой около 3-3,5 м для Азовского и Каспийского морей (проект MPSV12).

Предполагается строительство 4 единиц на замену буксиром-спасателям проекта 1454, буксиром-снабженцам проекта В-92/1 постройки 1983-1985 годов.

5. Морское водолазное судно – малое судно обеспечения с ледовым классом Ice2 для самостоятельной работы в мелкобитых разреженных льдах толщиной около 0,55 м с районом плавания R2, с осадкой до 2,4 м для работы в прибрежных морских районах при волнении с высотой 3 % обеспеченности до 7 м (проект SDS08).

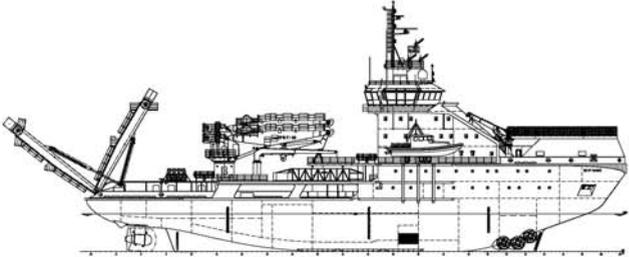
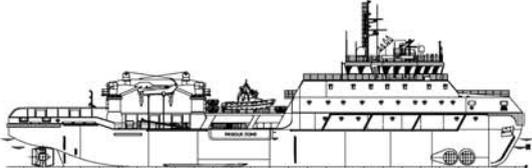
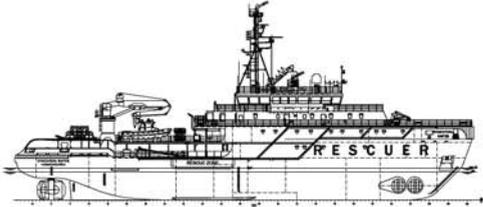
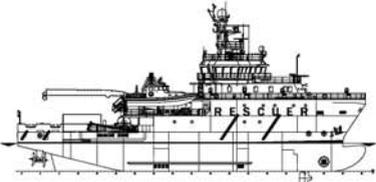
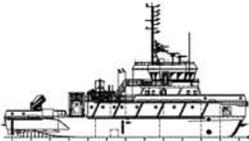
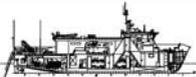
Таблиця 3

Главные характеристики многофункциональных судов-спасателей

Проект	Мощность, МВт	Вид сбоку (см. табл. 4)	Длина габаритная, м	Длина по КВЛ, м	Ширина габаритная, м	Ширина, м	Высота борта, м	Осадка по КВЛ, м	Рабочие осадки, м	Скорость хода, узлы	Скорость эконом-хода, узлы	Автономность, сутки	Класс РС
MPSV06	7	1	86,0	77,47	19,10	18,00	8,50	6,0	5,5-6,4	15	11	30	KM Icebreaker6 [2] AUT1-ICS OMBO FF2WS DYNPOS-2 EPP Salvage ship
MPSV12	3	2	82,00	74,20	17,40	16,60	6,00	3,20	3,20-4,50	13,8 (при осадке 3,2 м)	10	20	KM Arc4 [1] AUT1-ICS OMBO FF3WS DYNPOS-2 EPP ANTI-ICE ECO WINTERIZATION (-30) Salvage ship
MPSV07	4	3	73,0	69,03	16,60	15,50	6,70	4,5	4,3-5,1	15	10	20	KM Arc5 [1] AUT1-ICS OMBO FF3WS DYNPOS-2 EPP Salvage ship
MPSV09	2	4	55,20	51,60	13,30	12,70	6,25	4,50	4,1-5,0	12,5 (при осадке 4,15 м)	10	30	KM Ice1 AUT1-ICS OMBO FF2WS DYNPOS-2 EPP
SDS08	0,88	5	38,64	36,47	7,90	7,70	3,20	2,3		11,0	8	5	KM Ice2 R2 AUT3-C OMBO SDS <sub>≥60</sub>
A160	0,88	6	27,4	26,3	5,60		3,00	1,50		15,0	10	5	KM Ice2 R3-RSN AUT3 SDS<60 driving ship
A40	0,86	7	19,9	18,8	4,70		2,8	1,33		20,0	12	5	KM Ice2 R3-RSN AUT3 oil recover ship (>60)

Таблиця 4

*Схемы общих боковых видов параметрического ряда судов-спасателей*

№	Проект	Вид сбоку
1	MPSV06	
2	MPSV12	
3	MPSV07	
4	MPSV09	
5	SDS08	
6	A160	
7	A40	

Построена серия в количестве 4 единиц на замену устаревшим морским водолазным судам проектов 522, 535М постройки 1960-1975 годов.

6. Рейдовое водолазное судно с ледовым классом Ice2 для самостоятельной работы в мелкобитых разреженных льдах толщиной около 0,55 м с районом плавания R3-RSN, с осадкой около 1,5 м для работы в порту и на рейде при волнении 3 % обеспеченности до 3,5 м (проект А160).

Построена серия в количестве 10 единиц на замену рейдовым водолазным катерам проектов 1415, 376 постройки 1986-1992 годов.

7. Спасательный катер-бонопостановщик с ледовым классом Ice2 для самостоятельной работы в мелкобитых разреженных льдах толщиной около 0,55 м с районом плавания R3-RSN, с осадкой около 1,3 м для работы в порту и на рейде при волнении 3 % обеспеченности до 3,5 м (проект А40).

Построена серия спасательных катеров в количестве 6 единиц на замену спасательным катерам проектов HS-1500, HS-2000 RS постройки 1989-1990 годов.

**1. Многофункциональное спасательное судно мощностью 7 МВт проекта MPSV06** предназначено для обеспечения аварийно-спасательной готовности, для решения задач по оказанию помощи людям и судам, терпящим бедствие на море, и по ликвидации последствий морских аварий в любых погодных условиях, в том числе во льду.

МСС проекта MPSV06 представляет собой судно-ледокол с классом Icebreaker6 неограниченного района плавания с ледокольным форштевнем и крейсерской кормовой оконечностью, с удлиненной двухъярусной надстройкой бака, носовым расположением жилой надстройки и машинным отделением в средней части, с дизель-электрической энергетической установкой, с двумя полноповоротными винто-рулевыми колонками (ВПК) и носовыми подруливающими устройствами, с вертолетной площадкой в носовой части.

Судно оборудовано дизель-электрическим пропульсивным комплексом в составе четырех дизель-генераторов суммарной мощностью 10,6 МВт, двух гребных электродвигателей переменного тока, обеспечивающих работу двух полноповоротных ВПК с мощностью 3,5 МВт на каждом винте. Для работы во льдах ВПК оборудованы винтами фиксированного шага без насадок диаметром 3,6 м.

Судно имеет три носовых подруливающих устройства типа «винт в трубе» мощностью на входе 1000 кВт каждое. Подруливающие устройства совместно с винто-рулевыми колонками обеспечивают выполнение требований к судам с символом DYNPOS-2 в классе. Условия позиционирования выполняются при волнении 4 балла, ветре – 10 м/сек., течении 3 узла.

На судне предусмотрена установка глубоководного (до 300 м) мобильного водолазного комплекса в контейнерном исполнении и водолаз-

ного комплекса для выполнения работ на глубинах до 60 м (с аппаратурой подводного телевидения, подводной резки и сварки).

На судне предусматривается размещение глубоководного (до 1000 м) телеуправляемого аппарата типа «Scorpio», также имеется гидролокатор бокового обзора.

Для выполнения буксировочных операций и буксировки аварийных судов используется двухбарабанная автоматическая буксирная лебедка (на главной палубе в средней части судна) с тяговым усилием не менее 980 кН и буксирный гак с дистанционной отдачей.

Судно оборудовано спасательным скоростным рабочим катером для доставки аварийной партии и аварийного снабжения, а также сбора людей с поверхности воды и обеспечения промерной функции.

В качестве средств спасения людей с поверхности воды предусматривается установка двух (по одной с каждого борта) морских эвакуационных систем с закрытыми спасательными плотами, спасательным плотом (платформой) для посадки и спусковым слайдом для спуска в плоты и поднятия людей из воды. Кроме того, судно оснащено четырьмя сетями для массового сбора людей из воды, двумя комплектами плавучих носилок для подъема пострадавших из воды на борт судна, которые не имеют физической возможности самостоятельно подобраться к борту судна и стропом для подъема человека с палубы судна на вертолет.

Для размещения спасенных предназначается салон с сидячими местами на 75 чел., госпиталь на 6 коек. В каютах спецперсонала предусматриваются дополнительные откидные койки для спасенных. Общее число спальных мест – 20 (включая госпиталь).

Для ликвидации аварийных разливов нефти судно оснащено бортовой нефтесборной системой, двумя скиммерами щеточного типа, двумя комплектами бонового заграждения длиной 250 м каждый (тяжелый и постоянной плавучести), а также двумя катерами-бонопостановщиками.

При сборе разлитой нефти судно может принять на борт 530 куб. м смеси нефти и забортной воды.

Судно оборудовано средствами борьбы с пожаром на других судах, в соответствии с требованиями к судам с символом FF2 в классе, а также системой водяных завес и орошения (WS). Имеется три лафетных ствола производительностью по 1200 куб. м водой / 300 куб. м пеной каждый и телескопический ствол производительностью 40 кг/с для тушения химических грузов площадью возгорания 2500 кв. м. Для защиты вертолётной площадки предусматривается дополнительный лафетный ствол (140 м<sup>3</sup>/ч), установленный на палубе мостика.

Имеются водоотливные средства суммарной производительностью 1700 куб. м в час.

Установлены системы специальной обработки – дезактивации, дегазации и дезинфекции.

В носовой части судна установлена площадка для приёма вертолетов.

Для спуска и подъема аппарата типа «Scorpio», катеров, водолазного оборудования и развертывания средств ЛАРН на судне предусматривается установка двух поворотных кранов грузоподъемностью 32 т и вылетом стрел до 22,5 м, а также кормового П-образного крана грузоподъемностью 80 т и вылетом до 10 м.

Судно может перевозить до 650 тонн груза, 650 тонн топлива, 24 двадцатифутовых контейнеров, имеет грузовую палубу площадью 440 кв. м, грузовые трюма объемом около 800 куб. м.

Для размещения экипажа численностью 22 человека предназначаются 5 одноместных блок-кают и 5 одноместных кают комсостава (площадью не менее 12 м<sup>2</sup>) с санузлом и душем, 12 одноместных кают (площадью не менее 6 м<sup>2</sup>) с санузлом и душем. Предусматривается 2 запасных двухместных каюты. Для размещения спецперсонала численностью 12 человек предназначаются 12 одноместных кают с санузлом и душем.

Общее расположение судна представлено на рисунке 1.

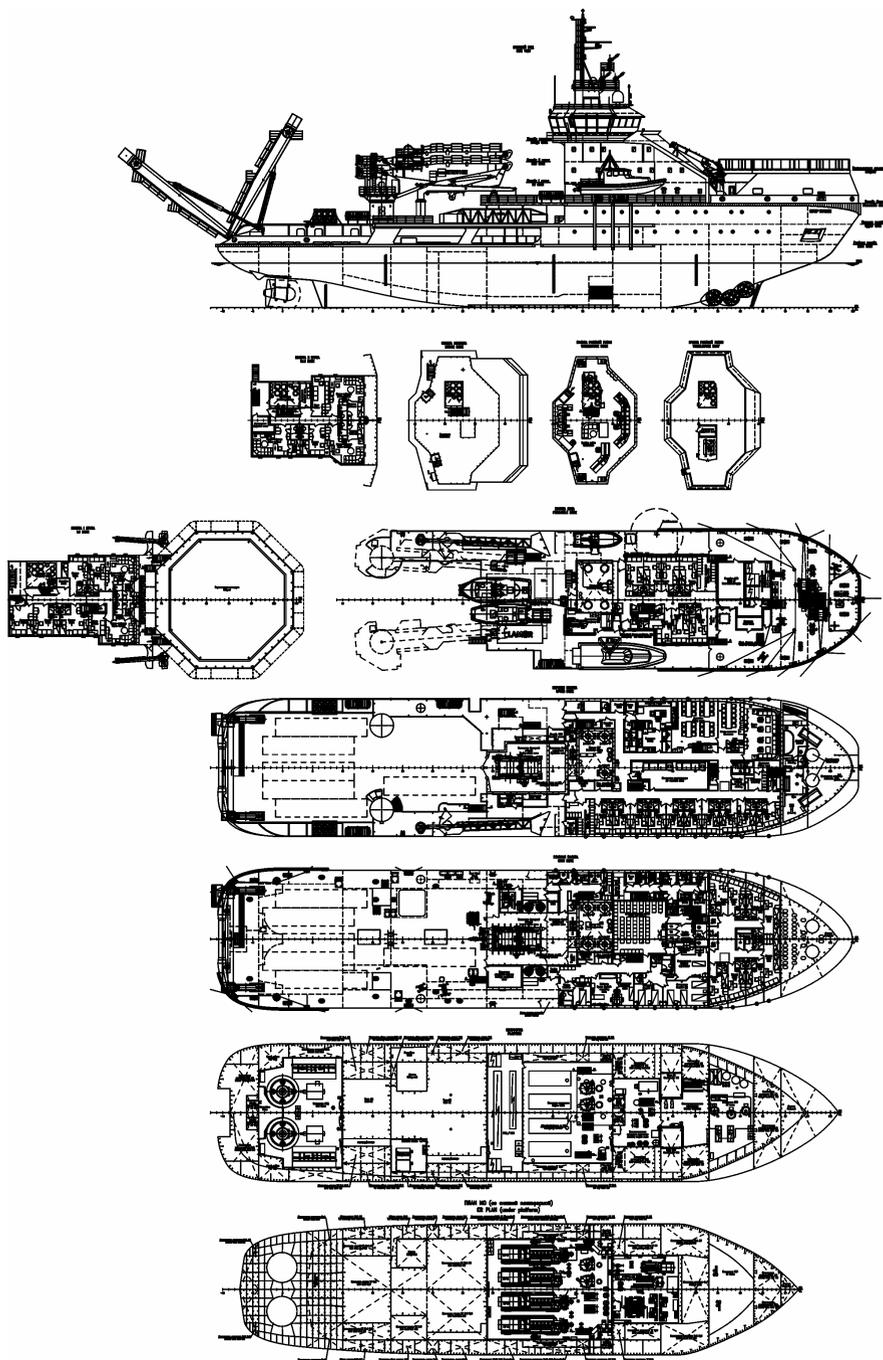
**2. Многофункциональное спасательное судно мощностью 4 МВт проекта MPSV07** предназначено для обеспечения аварийно-спасательной готовности для решения задач по оказанию помощи людям и судам, терпящим бедствие на море, и по ликвидации последствий морских аварий в любых погодных условиях, на ограниченных глубинах и во льду.

МСС проекта MPSV07 представляет собой судно с высоким ледовым классом Arc5, с удлиненной двухъярусной надстройкой бака, носовым расположением жилой надстройки и машинным отделением в средней части, с дизель-электрической энергетической установкой, с двумя полноповоротными ВПК суммарной мощностью 4 МВт и двумя носовыми подруливающими устройствами.

Дизель-электрический пропульсивный комплекс судна проекта MPSV07 состоит из четырех главных дизель-генераторов суммарной мощностью 5,48 МВт, двух гребных электродвигателей переменного тока, обеспечивающих работу двух полноповоротных ВПК с мощностью 2,0 МВт на каждом винте. Винты фиксированного шага диаметром 2,6 м, в насадках.

Контроль всех механизмов и систем осуществляется с одного дисплея системы ISC.

DYNPOS-2 – позиционирование судна с резервированием подсистем, обеспечивающих удержание судна на точке позиционирования при выходе из строя любого активного элемента системы – принципиально важно для работы с водолазами, подводными аппаратами и для тушения пожара. Требования динамического позиционирования DYNPOS-2 выполняются за счет работы двух носовых подруливающих устройств типа «винт в трубе» мощностью 995 кВт каждое и двух ВПК при волнении до 4 баллов, скорости ветра до 10 м/с, течения до 3 узлов.



*Рис. 1. Общее расположение многофункционального спасательного судна мощностью 7 МВт проекта MPSV06*

Морские буксировки обеспечиваются двухбарабанной буксирной лебедкой (тягой 75 тонн и 50 тонн) с автоматической и дистанционной отдачей буксирного троса, а также буксирным гаком 75 тонн, что обеспечивает гибкость в эксплуатации, а также возможность дублирования технических средств, т.е. более высокую надежность выполнения операции.

Судно проекта MPSV07 оборудовано скоростным рабочим катером со скоростью хода до 25 узлов и вместимостью до 17 человек для доставки аварийной партии и аварийного снабжения, а также сбора людей с поверхности воды.

На судне проекта MPSV07 предусмотрено специализированное оборудование, позволяющее осуществлять спасательные операции по подъёму из воды большого количества пострадавших:

- две площадки (в носовой и кормовой части судна) для зависания вертолетов для обеспечения экстренной эвакуации пострадавших на берег, для доставки дополнительных бригад медиков при необходимости, а также для приема груза;

- две сети для массового подъема людей из воды на борт судна по 7 м длиной (спуск и подъем осуществляются судовым краном);

- два комплекта плавучих носилок для подъема пострадавших из воды на борт судна, которые не имеют физической возможности самостоятельно подобраться к борту судна;

- два комплекта стропов для подъема человека с палубы судна на вертолет;

- две (по одной с каждого борта) морских эвакуационных системы с минислайдом, обеспечивающие массовый подъем людей из воды и наоборот: эвакуацию людей с самого судна.

На судне предполагаются к применению два мобильных водолазных комплексы:

- для выполнения работ на глубинах до 60 м (с аппаратурой подводного телевидения, подводной резки и сварки);

- глубоководный (необитаемый аппарат типа «Scorpio»).

Для ликвидации аварийных разливов нефти судно оборудовано бортовой нефтесборной системой, позволяющей оперативно развернуть заграждение при любом состоянии моря и начать выполнение судном операций по ликвидации аварийных разливов нефти, скиммером щеточного типа, двумя комплектами бонового заграждения длиной 250 м каждый (тяжелый и легкий), а также двумя катерами-бонопостановщиками.

При сборе разлитой нефти судно может принять на борт 670 куб. м смеси нефти и забортной воды.

Для откачки воды и нефтесодержащих смесей из отсеков аварийного судна предусматриваются водоотливные средства суммарной производительностью около 1200 м<sup>3</sup>/ч.

Для борьбы с пожаром на других судах установлено специальное оборудование в соответствии с требованиями FF3 (три лафетных ствола (по 1000 м<sup>3</sup>/ч вода и по 300 м<sup>3</sup>/ч пена) каждый, порошковая станция с ла-

фетным стволом 40 кг в секунду для тушения химических грузов, специальные пожарные насосы 2 x 1450 м<sup>3</sup>/ч) и система водяных завес и орошения (WS).

Установлен гидролокатор бокового обзора.

Для улучшения параметров обитаемости предусмотрена система успокоения бортовой качки.

Для спуска и подъема катеров, водолазного оборудования и развешивания средств ЛАРН имеются два крана грузоподъемностью по 20 тонн с вылетом стрелы 15,0 м.

Экипаж состоит из 20 человек. Спецперсонал – 12 человек.

Общее расположение судна представлено на рисунке 2.

**3. Многофункциональное спасательное судно мощностью 2 МВт проекта MPSV09** предназначено для обеспечения аварийно-спасательной готовности для решения задач по оказанию помощи людям и судам, терпящим бедствие на море, и по ликвидации последствий морских аварий в любых погодных условиях.

МСС проекта MPSV09 представляет собой судно с ледовым классом Ice1, с бульбовой носовой и транцевой кормовой оконечностями, с удлиненной двухъярусной надстройкой бака, носовым расположением жилой надстройки и машинным отделением в средней части, с дизель-электрической энергетической установкой, с двумя полноповоротными винто-рулевыми колонками и двумя носовыми подруливающими устройствами.

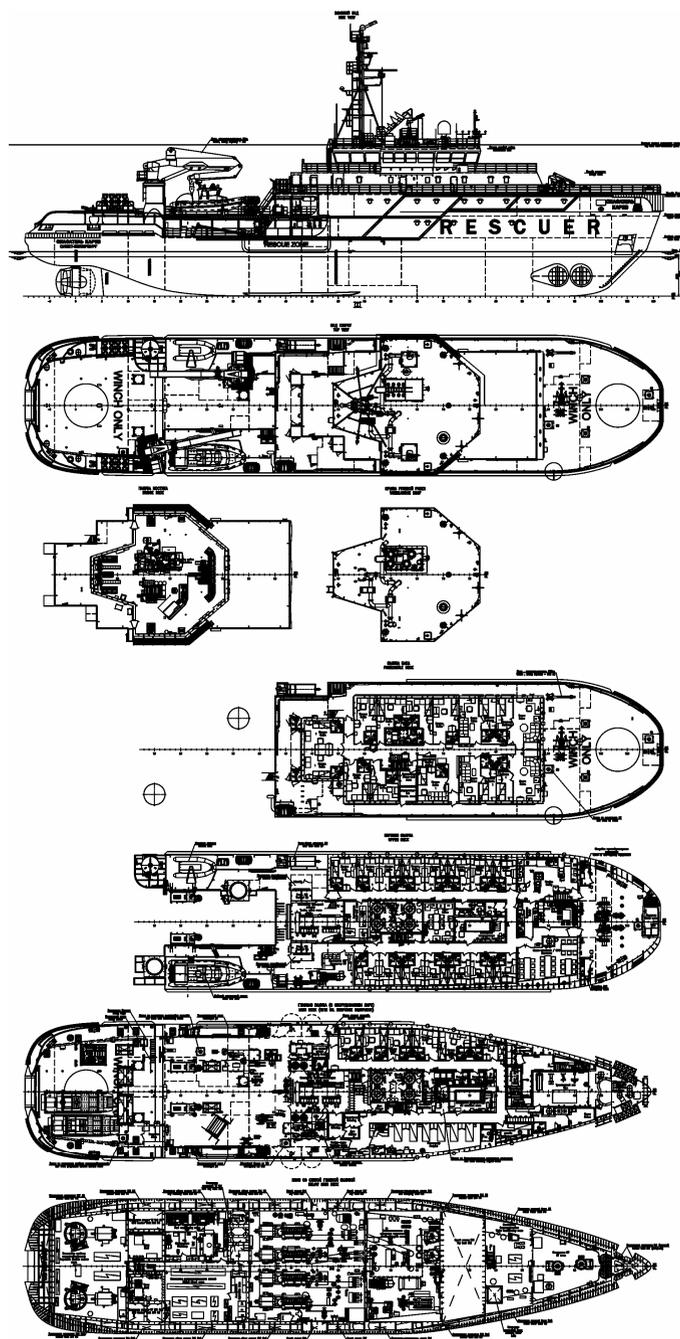
Главная энергетическая установка дизель-электрическая, состоящая из шести главных дизель-генераторов (ГДГ) переменного тока 440 В, 60 Гц электрической мощностью 535 кВт каждый, питающих главную электрическую сеть судна, от которой, в том числе, питается гребная электрическая установка.

Движение и управляемость судна обеспечивается двумя кормовыми полноповоротными винто-рулевыми колонками с винтами фиксированного шага. Мощность на входе к каждой ВРК – 900 кВт. Диаметр винта – 1900 мм.

Для обеспечения требований по динамическому позиционированию DYNPOS-2, а также для улучшения управляемости на малых ходах, при проходе узкостей и при швартовках на судне предусматривается носовое ПУ, типа «винт в трубе» с винтом фиксированного шага (ВФШ) и выдвигное носовое подруливающее устройство азимутального типа с винтом фиксированного шага.

Для выполнения буксировочных операций и буксировки аварийных судов используется автоматическая буксирная лебедка (на главной палубе в средней части судна) с тяговым усилием 50 т.

На судне устанавливается скоростной спасательный катер вместимостью 10 человек и скоростью до 25 узлов.



*Рис. 2. Общее расположение многофункционального спасательного судна мощностью 4 МВт проекта MPSV07*

Для подъема людей из воды на борт судна используются сеть длиной около 7 м типа Dacon Scoop и две сети длиной около 5 м типа Jasons Cradle, а также спасательная корзина и пневматическая платформа для подбора людей ППУ-5.

На главной палубе в средней части установлен электрогидравлический грузовой кран грузоподъемностью 20 т с максимальным вылетом стрелы 12 м.

На судне предусматривается размещение на палубе и обеспечение использования мобильного контейнерного водолазного комплекса выполнения подводно-технических работ на глубинах до 60 м.

Предусмотрена установка телеуправляемого необитаемого глубоководного аппарата с рабочей глубиной до 3000 м.

Имеется система водяных завес; система подогрева собранной нефти; система мойки танков собранной нефти. Предусматриваются переносные водоотливные средства производительностью около 1700 м<sup>3</sup>/ч.

Для размещения экипажа численностью 14 чел. и спецперсонала численностью 8 человека предназначаются 3 одноместных блок-каюты и 3 одноместных кают с санузлом и душем, 8 одноместных кают с откидывающимся спальным местом с санузлом и душем. Общее число мест – 23. Для временного размещения спасенных в количестве 40 чел. предназначаются: 20 сидячих мест в кают-компании; 14 сидячих мест в салоне для отдыха; 6 сидячих мест в офисе. Места спецперсонала могут также быть использованы для размещения спасенных.

**4. Многофункциональное спасательное судно-буксир мощностью 3 МВт проекта MPSV12** предназначено для обеспечения аварийно-спасательной готовности для решения задач по оказанию помощи людям и судам, терпящим бедствие на море, и по ликвидации последствий морских аварий в установленных поисково-спасательных районах Российской Федерации в любых погодных условиях, во льду и на существенном мелководье.

МСС представляет собой судно с усиленным ледовым классом Arc4, наклонным форштевнем, с двухъярусной удлиненной надстройкой бака, машинным отделением в средней части, с дизель-электрической энергетической установкой, с двумя полноповоротными винто-рулевыми колонками и носовыми подруливающими устройствами.

Судно неограниченного района плавания, но основной район эксплуатации предполагается в следующих морях:

- в Черном море – порты Кавказ;
- в Азовском море – Керченский пролив, Таганрогский залив, а также в морской части Волго-Донского судоходного канала (до порта Ростов-на-Дону);
- в Каспийском море – район порта Махачкалы, порт Оля, порт Астрахань;
- в Балтийском море – восточная часть Финского залива, Калининградский залив;

- в Баренцевом море – Кольский залив;  
- также порты Владивосток, Находка, Восточный, линия Ванино – Холмск, восточное побережье Камчатки, включая Анадырский залив.

Главная энергетическая установка – дизель-электрическая, состоящая из четырех главных дизель-генераторов (ГДГ) переменного тока 690 В, 50 Гц электрической мощностью 1140 кВт каждый, питающих главную электрическую сеть судна, от которой, в том числе, питается гребная электрическая установка.

В качестве пропульсивных устройств на судне предусматриваются две полноповоротные винторулевые колонки (ВРК) с винтами фиксированного шага в насадках. Привод каждой ВРК осуществляется от гребного электродвигателя (ГЭД) электрической мощностью 1800 кВт через промежуточный вал.

В качестве приводных двигателей четырех главных дизель-генераторов устанавливаются дизели максимальной длительной мощностью 120 кВт каждый.

Для обеспечения требований по динамическому позиционированию DYNPOS-2, а также улучшения управляемости на малых ходах, при проходе узкостей и при швартовках на судне предусматривается 2 носовых ПУ мощностью 1000 кВт каждое, типа «винт в трубе» с винтом фиксированного шага (ВФШ).

Судно оборудуется двухбарабанной (каскадного типа) автоматической буксирной лебедкой для выполнения буксировочных операций и буксировки аварийных судов, а также буксирным гаком.

Тяговое усилие лебедки принимается с учётом возможного достижимого упора винтами ВРК при нулевой скорости судна.

Для спасения людей с поверхности воды предусматриваются дополнительные средства, такие как морская эвакуационная система, спасательные сети и т.п.

Для доставки аварийных партий и для судовых нужд предусматривается спасательный скоростной рабочий катер.

Судно оборудуется 2-мя электрогидравлическими грузовыми консольными кранами на колоннах, расположенными на главной палубе по ПрБ и ЛБ.

На судне предусматривается возможность размещения следующего оборудования:

- водолазный комплекс для обеспечения работ на глубинах до 60 м (оборудование (включая медицинский гелий и медицинский кислород) размещается в двух 20-футовых контейнерах без постоянного базирования на судне);

- телеуправляемый необитаемый подводный аппарат для обеспечения работ на глубинах до 2000 м типа SCORPIO (размещение на палубе в контейнере без постоянного базирования на судне);

- телеуправляемый малогабаритный необитаемый подводный аппарат для обеспечения работ на глубинах до 300 м (размещение на палубе в контейнере без постоянного базирования на судне);

- автономный подводный аппарат Deep Worker 2000 (спуск может производиться корабельным краном; поставляется в контейнере международного образца без постоянного базирования на судне).

Кроме того, на судне предусматривается следующее оборудование:

- бортовая нефтесборная система (2 бортовых трала ПрБ и ЛБ) с гидравлическими насосами перекачки собранной нефти производительностью 100 м<sup>3</sup>/ч каждый с телескопическими кранами вылетом 12 м;

- катушка с тяжелыми нефтеограждающими боами длиной 250 м;

- катушка с боами постоянной плавучести длиной 250 м;

- скиммер щеточного типа;

- дизель-гидравлический агрегат (2 единицы) для привода оборудования ЛАРН.

- 2 стационарные панели управления оборудованием ЛАРН (устанавливаются побортно);

- скиммер, 2 переносные панели управления оборудованием ЛАРН, комплект гидравлических шлангов на катушке и без, якорей, поплавков, буксировочные комплекты, воздуходувки для надувных бонов со шлангами, инжекторный насос для скиммера хранятся в 10' контейнере, специально оборудованном для хранения по-походному оборудования ЛАРН;

- катера-бонопостановщики с откидной носовой аппарелью (2 единицы). Скорость до 25 узлов. Грузоподъемность до 1700 кг;

Для выполнения специальных операций в соответствии с назначением судна предусмотрены следующие специальные системы: специальная система водяного пожаротушения; специальная система пенотушения; специальная система порошкового тушения; система водяных завес; система водоотливная спасательная; система собранной нефти.

Для тушения пожаров на внешних объектах на судне предусматривается автономная специальная система водяного пожаротушения, предназначенная для подачи воды к водяным лафетным стволам, клапанным коробкам, для питания системы водяных завес.

Состав оборудования системы соответствует знаку класса РС FF3WS.

На судне предусматривается специальная система пенотушения, предназначенная для тушения горящих объектов подачей воздушно-механической пены низкой кратности.

Подача пены осуществляется через лафетные стволы и клапанные коробки специальной системы водяного пожаротушения.

Предусмотрено 4 комплекта переносных воздушно-пенных стволов с пеногенераторами.

Запас пенообразователя размещается в цистерне, вместимость которой обеспечивает работу одного лафетного ствола в течение не менее 30 мин.

На судне предусматривается лафет производительностью 40 кг/с специальной система порошкового тушения, предназначенной для тушения пожаров на химовозах и газовозах. В резервуаре находится порошок в количестве ок. 2500 кг, обеспечивающем тушение пожара на площади ок. 2500 м<sup>2</sup>.

Для защиты судна от теплового воздействия горящего объекта (судна, буровой установки и т.д.) предусматривается система водяных завес. Система водяных завес защищает вертикальные наружные поверхности корпуса судна, включая надстройку и рубку, а также горизонтальные поверхности корпуса, при этом не создает помехи видимости из ходовой рубки, постов управления пожарно-спасательными операциями и площадок лафетных стволов с ручным управлением.

На судне имеется 12 мест для экипажа, 17 мест для спецперсонала и 50 сидячих мест для спасенных. Общее количество мест на судне (включая сидячие) – 79.

Предусмотрен медицинский блок, в составе: кабинет врача, совмещенный с амбулаторией; стационар на три места (2 места – мужское отделение и 1 – женское отделение); изолятор на одно место.

**5. Морское водолазное судно проекта SDS08** предназначено для обеспечения аварийно-спасательной готовности в установленных морских поисково-спасательных районах Российской Федерации для решения задач по оказанию помощи людям и судам, терпящим бедствие на море, и по ликвидации последствий морских аварий, с проведением водолазных, подводно-технических работ на глубинах до 100 м, обеспечением эксплуатации подводных аппаратов и забортных технических средств при волнении до 4 баллов.

МВС представляет собой мелкосидящее многофункциональное судно для обеспечения аварийно-спасательной готовности в морских, прибрежных и устьевых акваториях с ледовым классом Ice2, с наклонным форштевнем и транцевой кормовой оконечностью, с удлиненной надстройкой бака, с носовым расположением жилой надстройки и машинным отделением в корме, с дизельной энергетической установкой, двухвальное с винтами регулируемого шага, с носовым подруливающим устройством.

Преимущественно морские условия эксплуатации нового концепта потребовали создания корпуса с хорошими мореходными качествами. В то же время, значительная высота борта не должна была мешать выполнению основной функции судна – водолажным работам. Исходя из этого, судно было выполнено с удлиненным баком, простирающимся до мидель-шпангоута, что обеспечило высокий надводный борт в носовой части и низкий надводный борт в районе рабочей площадки для спуска водолазов. Кроме того, для уменьшения слеминга, носовые шпангоуты выполнены V-образной формы.

Управляемость судном обеспечивают два кормовых обтекаемых подвесных балансирующих руля. Управление рулевым устройством осуществляется из рулевой рубки с пульта судовождения.

Носовое ПУ мощностью 125 кВт типа «винт в трубе» с винтом фиксированного шага (ВФШ) служит для улучшения управляемости на малых ходах, при проходе узкостей и при швартовках.

На судне установлена дежурная шлюпка вместимостью 6 человек и два сбрасываемых надувных спасательных плота вместимостью по 16 человек каждый.

На верхней палубе по ЛБ имеется грузовой кран с грузоподъемностью 2,3 т (при максимальном вылете стрелы 11,5 м).

Судно имеет двухвальную пропульсивную установку. Каждый валопровод состоит из гребного вала, дейдвудного устройства, системы охлаждения и смазки, гребного винта регулируемого шага. Мощность каждого из двух главных двигателей 442 кВт. Судно показало на испытаниях скорость 12,5 узлов.

В состав электроэнергетической установки входят два дизель-генератора мощностью по 136 кВт каждый и аварийный дизель-генератор мощностью 28 кВт.

МВС должно обеспечивать следующие функции: водолазные и подводно-технические работы на глубинах до 100 метров при волнении моря до 3-х баллов; участие в проведении спасательных, судоподъемных и гидротехнических работ в объеме установленных на судне средств; обследования дна акваторий, затонувших объектов, подводной части корпусов судов (кораблей) и гидротехнических сооружений; обеспечения эксплуатации малогабаритных телеуправляемых подводных аппаратов при волнении моря до 4 баллов; обследования дна акваторий, подводных частей корпусов и винто-рулевых устройств кораблей (судов), подводной части гидротехнических сооружений и выполнение подводных работ с помощью водолазов; выполнения подводной сварки на глубинах до 25 метров и резки на глубинах до 100 метров; подъема с глубин до 100 метров обнаруженных предметов массой до 2,0 т; грунторазмыва и удаления грунта; откачки воды с аварийного судна; продувки понтонов; работы с гидравлическим инструментом.

SDS08 отличается от судов-аналогов:

1. На судне установлено водолазное оборудование, позволяющее выполнять водолазные и подводно-технические работы на глубинах до 100 метров.

2. За счет наличия двух воздушно-пенных лафетных стволов судно имеет возможность тушения пожаров на других судах и плавобъектах.

3. На судне установлена буксирная лебедка, обеспечивающая выполнение функций вспомогательной буксировки.

4. Предусмотрена возможность размещения на судне боновых заграждений и скиммера для обеспечения функции ЛАРН.

5. Характеристики судна и специального оборудования обеспечивают выполнение подводных спасательных операций при волнении до 3-х баллов, при этом подход судна к месту проведения спасательной операции возможен при высоте волн до 7 метров.

6. Для обеспечения требуемых ходовых качеств на судне установлено два высокооборотных главных двигателя мощностью 442 кВт каждый, работающие на винты регулируемого шага, а также – для удержания судна над местом выполнения работ – предусмотрено носовое подруливающее устройство мощностью 120 кВт.

7. Наличие на борту судна современного телеуправляемого подводного аппарата позволяет выполнять обследование дна акваторий, подводных частей корпусов и винто-рулевых устройств кораблей, а также подводной части гидротехнических сооружений.

8. Для работ по подъему затонувших судов, ремонту подводной части кораблей, ремонту гидротехнических сооружений, а также для обеспечения спасательных операций предусмотрено оборудование для подводной сварки на глубинах до 25 метров и подводной резки на глубинах до 100 метров, кроме того, грузоподъемное оборудование судна позволяет поднимать отдельные фрагменты затонувших объектов весом до 2 т с глубины до 100 м.

9. При участии в операциях по снятию судов с мели обеспечивается возможность откачки воды из затопленных отсеков аварийного судна, а также продувка судоподъемных понтонов.

Установка расширенного перечня специализированного оборудования, а также мощная энергетическая установка, позволяют судну нового концепта решать практически любые специализированные задачи, связанные с подводно-техническими работами на глубинах до 100 м.

Помимо основных выше перечисленных функций, новый концепт имеет возможность тушить пожары на других судах с помощью двух воздушно-пенных лафетных стволов производительностью по 180 куб.м в час, выполнять функции буксировщика (устанавливается в корме якорно-швартовно-буксирная лебедка с усилием 7 тонн), откачивать воду из отсеков аварийного судна, участвовать в операциях по борьбе с разливом нефти.

Подобная многофункциональность является уникальной для судна длиной всего 38 метров.

Для выполнения перечисленных выше специальных функций на судне было установлено современное оборудование для водолазных и вспомогательных спасательных работ.

Спуск водолазов может осуществляться как по водолазному трапу, так и с использованием водолазного полуколокола («мокрого» колокола).

Установлений на судне полуколокол предназначен для спуска трех человек – двух работающих водолазов и одного оператора полуколокола на глубины до 60 м на воздухе и до 100 м на дыхательных газовых смесях. Полуколокол оснащен системой газораспределения и подачи газов, системами внешнего и внутреннего освещения и видеонаблюдения, системой кислородных дыхательных BIBS<sup>1</sup>-масок, системой связи с гелиевым корректором речи.

Спуско-подъемное устройство полуколокола обеспечивает вынос его за борт судна, спуск/подъем полуколокола с заданной скоростью, автоматическую подачу КШС<sup>2</sup> полуколокола.

Двухотсечная поточно-декомпрессионная барокамера внутренним диаметром 1600 мм позволяет проводить одновременную декомпрессию двух смен водолазов под разными давлениями. Вместимость каждого отсека барокамеры – 2 лежачих или 4 сидячих места. Рабочее давление – 10 кг/см<sup>2</sup>.

Для снабжения барокамеры кислородом и гелием, а также для проведения водолазных спусков в водолазном колоколе с применением для дыхания 10 % КАГС<sup>3</sup> в состав комплекса входят моноблоки для хранения сжатого гелия и кислорода. Моноблоки состоят из 6 баллонов объемом 50 л и рабочим давлением 200 кг/см<sup>2</sup>. Количество моноблоков для хранения гелия – 6 шт. (два для обеспечения барокамеры и четыре для проведения спусков), для хранения кислорода – 2 шт. (один для обеспечения барокамеры и один для проведения спусков). Моноблоки баллонов установлены на палубе судна. Моноблоки, предназначенные для проведения водолазных спусков, могут храниться как на судне, так и на берегу и устанавливаться на судно только при необходимости проведения работ на глубинах от 60 до 100 м.

Для зарядки воздушных баллонов, используемых для работы барокамеры и проведения водолазных спусков, применяются компрессоры фирмы BAUER. На судне установлены компрессоры специального морского исполнения, которые отличаются усиленной вибро- и ударозащищенностью, стойкостью к коррозии в морских условиях и способностью работать в условиях качки до 300.

Установленный в водолазном посту интегрированный пульт управления выполняет функции:

- управления спуском/подъемом водолазного полуколокола;
- подачи воздуха и кислорода к полуколоколу;
- подачи газов к барокамере;
- связи с водолазами, находящимися под водой и в барокамере;
- видеонаблюдения и контроля за работой водолазов под водой и находящихся в барокамере;

---

<sup>1</sup> building inlets breathing system

<sup>2</sup> кабель-шланговая связка

<sup>3</sup> кислородно-азотно-гелиевая смесь

- видеонаблюдения и контроля за проведением спуска водолазного полуколокола.

Компоновка пульта обеспечивает возможность управления всеми технологическими процессами с одного рабочего места и позволила сократить численность экипажа.

Для нагрева и подачи забортной горячей воды по КШС в водообогреваемое водолазное снаряжение предусмотрена установка водообогрева водолазов. Количество водолазов, подключаемых к установке – 3. Расход воды – 15-41 л/мин. Температура воды – 30-60 °С.

Предусмотрена поставка на судно средств выполнения ПТР в составе снаряжения рабочего водолаза; снаряжения оператора полуколокола; подводного освещения; подводного телевидения; комплекта водообогреваемого снаряжения; комплекта для подводной сварки и резки; грунтоуборочного оборудования.

Проверка возможности работы водолазного комплекса на глубинах до 100 м была выполнена 12 декабря 2011 года на базе водолазного судна «Стольный град Ярославль» в Каспийском море в точке с глубиной 108 м. Во время испытания т/х «Стольный град Ярославль» был ошвартован у судна сопровождения. В период испытаний осуществлены четыре последовательных спуска и подъема водолазного полуколокола до заданной глубины 100 м и обратно до захватывающего устройства. В период проведения испытаний каких-либо отказов, неисправностей в работе составляющих частей водолазного комплекса не наблюдалось.

Экипаж численностью 12 человек (из них 7 человек – спецперсонал) размещен в 5 двухместных каютах и 2 одноместных каютах. Кроме того, предусмотрены запасные двухместная и одноместная каюты для прикомандированных, руководства спасательных операций и для медицинских нужд. Общее число мест – 15.

Общее расположение судна представлено на рисунке 3.

#### **6. Рейдовое водолазное судно проекта А160.**

Рейдовый водолазный катер предназначен для обеспечения аварийно-спасательной готовности для решения задач по оказанию помощи людям и судам, терпящим бедствие на море, и по ликвидации последствий морских аварий, обеспечению проведения водолазных работ на глубинах до 45 м в установленных прибрежных морских поисково-спасательных районах, на акваториях бухт, заливов, морских портов Российской Федерации.

РВК проекта А160 представляет собой однопалубный катер со средним расположением одноярусной рубки, несколько смещенным в корму машинным отделением, двухвальной дизельной энергетической установкой.

Дальность плавания по запасам топлива и масла – около 200 миль.

Экипаж – 3 человека. Спецперсонал – 5 человек.

Мощность каждого из двух главных двигателей 441 кВт.

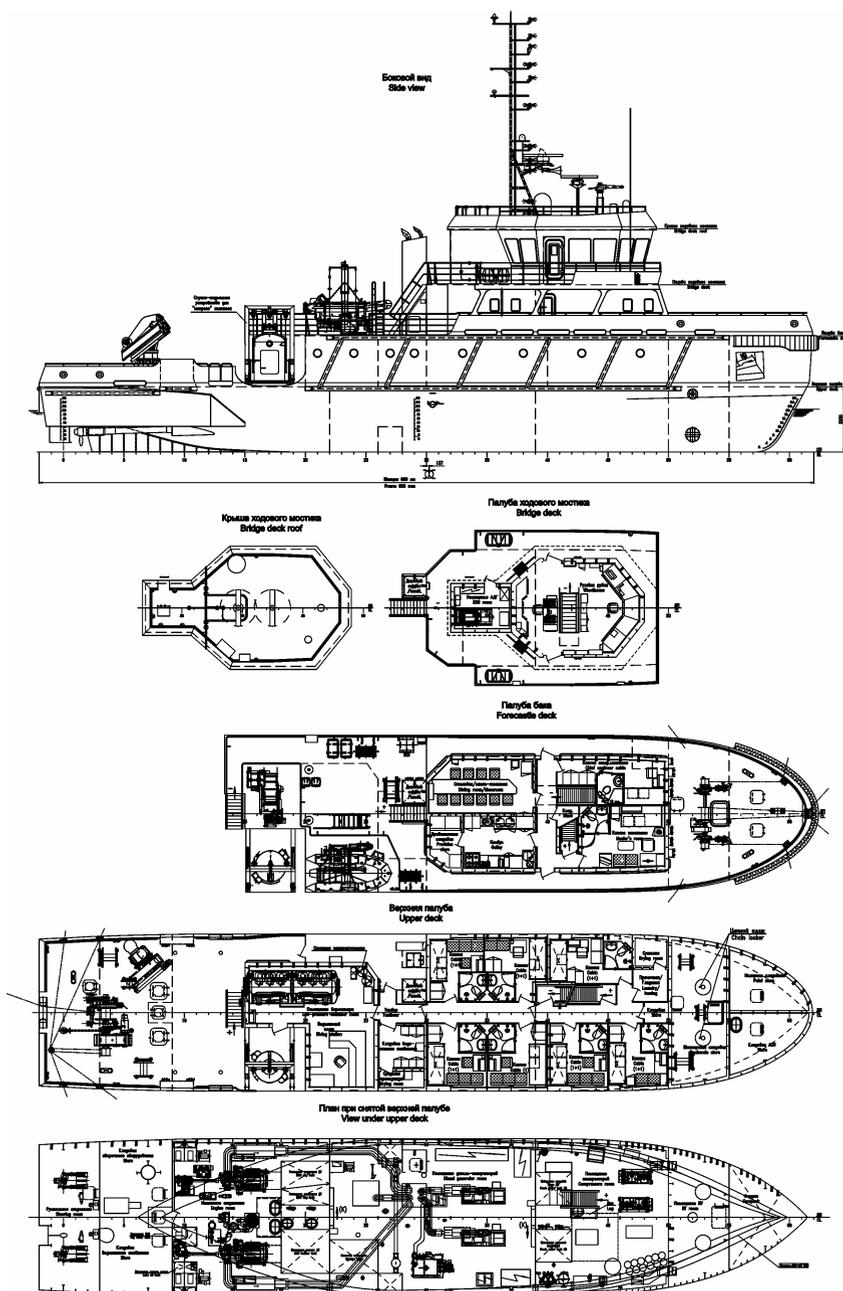


Рис. 3. Общее расположение морского водолазного судна проекта SDS08

Назначение:

- водолазное обеспечение подводно-технических работ на глубинах до 60 метров при волнении моря до 3-х баллов;
- участие в аварийно-спасательных и судоподъемных операциях;
- обследование дна акваторий, затонувших объектов, подводной части корпусов судов (кораблей) и гидротехнических сооружений.

#### **7. Спасательный катер-бонопостановщик проекта А40.**

Спасательный катер-бонопостановщик предназначен для обеспечения аварийно-спасательной готовности по оказанию помощи людям и судам, терпящим бедствие на море, ликвидации последствий морских аварий, транспортировки и постановки боновых морских ограждений с целью локализации и ликвидации разливов нефти, участия в построении нефтесборных ордеров в установленных прибрежных морских поисково-спасательных районах, на акваториях бухт, заливов, морских портов Российской Федерации.

Дальность плавания по запасам топлива и масла – около 250 миль.  
Экипаж – 2 человека. Спецперсонал – 6 человек.

Мощность каждого из двух главных двигателей 428 кВт.

Назначение:

- транспортировка и постановка плавучих боновых ограждений, доставка к местам разливов аварийных партий и природоохранного оборудования;
- локализация распространения пролитых нефтепродуктов в жесткие плавучие емкости объемом не менее 2 м<sup>3</sup> и дальнейшая их буксировка к месту приема береговыми или плавучими станциями;
- построение нефтесборных ордеров.

**Строительство и использование.** За период с 2010 года из выше перечисленной линейки вошли в строй двадцать одно судно проектов MPSV07, SDS08, A160, A40 (заводы-строители: «Нижегородский Теплоход», Невский судостроительно-судоремонтный завод, Ярославский завод, Судоверфь братьев Нобель в Рыбинске), достраиваются еще два МСС проекта MPSV07 и в работе находятся три МСС проекта MPSV06. Предполагаются к постройке еще два МСС проекта MPSV09 и четыре МСС проекта MPSV12, а также ряд других судов.

При этом, за столько короткий период эксплуатации суда-спасатели нового поколения уже успели принять участие в реальных спасательных операциях (операция по спасению танкера «Григорий Бугров» в октябре 2011 года, операция по спасению сухогруза «Тихон Семушкин» в апреле-мае 2012 года) и учениях («Арктика-2011»).

Во время спасательной операции танкера «Григорий Бугров» в октябре 2011 года МСС проекта SDS08 «Стольный град Ярославль» прошел настоящее боевое крещение.

Краткая справка: в 14.32 13 октября танкер, имея на борту груз – 6138 тонн мазута и запасы – 44 тонны дизельного топлива, 1,5 тонны масла, 5 тонн льяльных вод и 30 тонн пресной воды, столкнулся с неизвестным подводным объектом. После столкновения в течение короткого времени было затоплено машинного отделение, судно потеряло ход, обесточилось, получило крен около 30 градусов на ЛБ и дифферент 4,5 м на корму. В результате танкер сел кормой на грунт. Танкер получил пять последовательных пробоин днища с ЛБ на длине около 96 м (72% от габаритной длины судна – от форпика до МО) и принял около 3000 тонн забортовой воды (28 % от водоизмещения по ЛГВЛ). Учитывая, что на борту было еще и 6138 тонн груза и около 80 тонн запасов, следует признать, что состояние судно было крайне опасным и сама операция с таким объектом крайне тяжелой (как говорится, «на грани возможного»). «Стольный град Ярославль» обеспечивал работу водолазов, поставил боновое ограждение и был, как самое новое судно из принимавших участие в операции, с современными средствами коммуникации и связи, местом размещения штаба. Результат аварийно-спасательной операции: экипаж танкера не пострадал, разлива груза не допустили, судно «Григорий Бугров» спасено.

Кроме того, «Стольный град Ярославль» принял участие в праздничных мероприятиях, посвященных тысячелетию основания города Ярославля в сентябре 2010 года.

МВС проекта SDS08 «Ростов Великий» в августе 2011 года участвовал в комплексных учениях сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций «Арктика-2011» в акватории губы Буор-Хая моря Лаптевых, порт Тикси. Согласно сообщениям Государственного морского спасательно-координационного центра в ходе учений отрабатывались следующие учебные задачи: «Ликвидация аварийного разлива нефти регионального значения», «Поиск и спасание людей терпящих бедствие на море» и «Тушение пожара на аварийном судне». Учебные цели были достигнуты. «Ростов Великий» был самым новым судном из состава комплексной группировки флота, принявшей участие в учениях «Арктика-2011».

В апреле – мае 2012 года МВС «Ростов Великий» спасал сухогруз «Тихон Семушкин», выполняя работы по откачке воды из машинного отделения, водолазные работы и обеспечение буксировки.

Краткая справка: судно «Тихон Семушкин» из-за спора хозяйствующих субъектов около трех лет стояло брошенным у пирса в поселке Авача. В апреле 2012 года вандалы выкрутили клапаны, выполненные из цветного металла, из системы охлаждения главного двигателя, в машинное отделение хлынула вода. Судно опустилось кормой на грунт, возникла опасность опрокидывания сухогруза и разлива топлива. Водолазам удалось герметизировать судно, затем сухогруз был отбуксирован к причалу Сахалинского бассейнового аварийно-спасательного управления (в Петропавловске-Камчатском). С помощью оборудования МВС откатали

около 100 кубометров нефтесодержащих вод из цистерн аварийного судна и устранили опасность опрокидывания судна. Машинное отделение и другие загрязненные мазутом помещения обработали сорбентом.

### Заключение

1. Потребности ФБУ «Госморспасслужба России» в настоящее время оцениваются в 104 новых судов и катеров, в том числе 15 МСС, 6 МВС, 5 рейдовых водолазных судов, 23 спасательных катера-бонопостановщика.

2. Общей тенденцией является строительство многофункциональных спасательных судов и повышение мощности энергетической установки.

3. Основными факторами, определяющими успешное выполнение всего спектра аварийно-спасательных работ являются достаточные ледопробитость, ходкость на чистой воде, мореходность с учетом ограничений по осадке, которые актуальны для значительной части морских акваторий страны.

4. Многообразие условий плавания, ледовых условий, глубин в каждом конкретном месте несения АСГ привело к созданию семи базовых концептов с различными главными параметрами, включая:

- морское многофункциональное аварийно-спасательное судно – ледокол мощностью 7 МВт для самостоятельной работы в сплошном ледяном поле толщиной около 1 м с неограниченным районом плавания, с возможностью выполнения ледокольных операций при толщине льда до 1,5 м, с осадкой около 6-6,5 м для Северного морского пути и Дальневосточного бассейна;

- морское многофункциональное аварийно-спасательное судно мощностью 4 МВт с высоким ледовым классом Arc5 для самостоятельной работы в сплошном ледяном поле толщиной около 0,5 м, с неограниченным районом плавания, с возможностью плавания в канале за ледоколом в среднем однолетнем льду толщиной до 1,2 м, с осадкой около 4,5-5 м для Балтийского и Черного морей;

- морское многофункциональное аварийно-спасательное судно мощностью около 2 МВт с неограниченным районом плавания, с осадкой около 5 м для незамерзающих акваторий;

- морское многофункциональное аварийно-спасательное судно мощностью около 3 МВт с высоким ледовым классом Arc4 для самостоятельной работы в разреженных тонких однолетних льдах толщиной до 0,7 м в зимне-весеннюю навигацию и до 0,9 м в летне-осеннюю навигацию, с неограниченным районом плавания, с осадкой около 3-3,5 м для Азовского и Каспийского морей;

- морское водолазное судно – малое судно обеспечения с ледовым классом Ice2 для самостоятельной работы в мелкобитых разреженных льдах толщиной около 0,55 м с районом плавания R2, с осадкой до 2,4 м для работы в прибрежных морских районах при волнении с высотой 3 % обеспеченности до 7 м;

- рейдовое водолазное судно с ледовым классом Ice2 для самостоятельной работы в мелкобитых разреженных льдах толщиной около 0,55 м с районом плавания R3-RSN, с осадкой около 1,5 м для работы в порту и на рейде при волнении 3 % обеспеченности до 3,5 м;

- спасательный катер-бонепостановщик с ледовым классом Ice2 для самостоятельной работы в мелкобитых разреженных льдах толщиной около 0,55 м с районом плавания R3-RSN, с осадкой около 1,3 м для работы в порту и на рейде при волнении 3 % обеспеченности до 3,5 м.

5. В соответствии с изложенными концептами уже построено с 2010 года 21 новое судно для несения АСГ, а еще 7 находятся в постройке.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Артомонов В.В. Критерий оптимизации численного и качественного состава аварийно-спасательного флота для ликвидации открытых нефтегазовых фонтанов и пожаров на морских промыслах // Труды IV Всесоюзной конференции «Мировой океан». – Владивосток, 1983. – С. 33-35.
2. Буянов А.С. Анализ состояния аварийно-спасательного флота России // Проблемы развития морского флота. – СПб.: ЦНИИ морского флота, 2009. – С. 107-114.
3. Гурович А.Н., Родионов А.В. Проектирование спасательных и пожарных судов. – Л.: Судостроение, 1971. – 284 с.
4. Егоров Г.В., Ворона О.А., Черний В.А. Комплексный подход к борьбе за живучесть судна с учетом требований прочности на примере спасательной операции с танкером «Григорий Бугров» // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2011. – С. 23-24.
5. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Автутов Н.В. Концепты российских многофункциональных судов-спасателей нового поколения // Судостроение и судоремонт. – 2010. – № 41. – С. 24-32.
6. Егоров Г.В., Тонюк В.И. Морские водолазные суда типа «Стольный град Ярославль» // Судостроение. – 2012. – № 3. – С. 17-23.
7. Карев В.И. Морские спасатели России. – М.: Морской флот, 2007. – 444 с.
8. Любимов Е.В. Выбор проектных характеристик пожарных судов на ранних стадиях проектирования // Судостроение. – 1986. – № 3. – С. 4-5.

9. Сидорченко В.Ф. *Суда-спасатели и их служба.* – Л.: Судостроение, 1983. – 240 с.
10. Спитковский М.И. *Суда технического и служебно-вспомогательного флота.* – М.: Транспорт, 1965. – 295 с.

*Стаття надійшла до редакції 20.11.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співпрацівник Морського інженерного бюро, науковий консультант **В.В. Козляков**

УДК 629.5

А.Г. Егоров

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ БАРЖЕ-БУКСИРНОГО  
СОСТАВА СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ «ДНЕПРО-МАКС» КЛАССА**

*Изложены основные путевые ограничения, определяющие длину, ширину, осадку, надводный габарит судов смешанного плавания. Среди них размеры судоходного пути, габариты рабочих камер шлюзов, размеры и глубины портовых акваторий и причалов, размеры подходных каналов, габариты мостов и линий электропередачи, ограничения морских подходных каналов. Учет подобных ограничений иллюстрируются на примере выбора главных размерений судна «Днепро-Макс» класса, предназначенного для работы на Днепре, Дунае (до Рени), в морских портах Черноморского бассейна, а также в морских мелководных портах Азовского бассейна, таких как Ростов-на-Дону, Азов, Ейск, Таганрог, Темрюк, Кавказ, Мариуполь и Бердянск.*

**Ключевые слова:** проектирование, суда смешанного река-море плавания, главные размерения, путевые условия, «Днепро-Макс» класс.

*Викладені основні путні обмеження, які визначають довжину, ширину, осадку, надводний габарит суден змішаного плавання. Серед них розміри судноплавного шляху, габарити робочих камер шлюзів, розміри й глибини портових акваторій і причалів, розміри підхідних каналів, габарити мостів і ліній електропередачі, обмеження морських підхідних каналів. Врахування подібних обмежень ілюструється на прикладі вибору головних розмірень судна «Дніпро-Макс» класу, призначеного для роботи на Дніпрі, Дунаї (до Рені), в морських портах Чорноморського басейну, а також у морських мілководних портах Азовського басейну, таких як Ростов-на-Дону, Азов, Єйськ, Таганрог, Темрюк, Кавказ, Мариуполь і Бердянськ.*

**Ключові слова:** проектування, судна змішаного ріка-море плавання, головні розмірення, путні умови, «Дніпро-Макс» клас.

*Main way restrictions which determine length, breadth, draught, air draught of mixed river-sea navigation vessels are stated. Navigation way conditions, dimensions of working lock chambers, sizes and depths of port water areas and moorings, sizes of approach channels, dimensions of bridges and transmission lines, restrictions of sea approach channels among them. The account of such restrictions are illustrated by the example of choice of main dimensions of "Dnipro-Max" class vessel assigned for work on Dnieper, Danube (up to Reni), in Black Sea pool seaports, and also in Azov pool sea shallow ports such as Rostov-on-Don, Azov, Yeysk, Taganrog, Temryuk, Caucasus, Mariupol and Berdyansk.*

**Постановка проблемы.** В науке о проектировании давно известно, что для получения наибольшего экономического эффекта необходимо создавать судно с максимально возможным дедвейтом. В идеале необходимо добиться наилучшего сочетания главных элементов судна (главных размерений, скорости, дедвейта, объема грузовых пространств).

На самом же деле выбор главных размерений нового судна зависит от предполагаемого района эксплуатации этого судна (от портов захода, от габаритов и глубин судоходных путей). Примеров таких судов немало: «Суэцмаксы» (ограничения по Суэцкому каналу), «Панамаксы» (ограничения по Панамскому каналу), «Хендимаксы» (ограничения по японским портам), «Волго-Дон максы» (по ограничениям ВВП европейской части РФ), «Волго-Балт максы» (по ограничению ВБВП), «Азов максы» (по ограничениям устьевых портов Азовского бассейна) и др.

В публикациях профессора Г.В. Егорова [6-8] показано, что для судов ограниченного (в том числе река-море) района плавания выбор главных размерений полностью определяется путевыми условиями.

Несмотря на очевидные путевые ограничения, в советское время подходы к проектированию судов ограниченного плавания были схожи со стандартной («морской») схемой определения главных размерений и элементов. В книге [3] главные размерения и элементы судов внутреннего плавания определялись, исходя из уравнения весов, когда  $L$ ,  $B$ ,  $D$  являются функциями дедвейта  $Dwt$  и скорости  $V_s$  (при этом величина осадки  $d$  может задаваться как постоянное ограничение). В книге [25] предлагалось определять главные элементы, исходя из оценки водоизмещения  $\Delta$  через коэффициенты утилизации и далее на основе совместного решения уравнений веса и мощности с последующим определением главных размерений и коэффициентов полноты.

Поэтому анализ ограничений, накладываемых условиями эксплуатации, представляет принципиальный интерес для выбора главных размерений составных судов (барже-буксирных составов) смешанного река-море плавания (ББС) и является **целью настоящей статьи**.

**Изложение основного материала.** Исследование проводится для ББС класса «Днепро-Макс» – составных судов, предназначенных для работы на Днестре, Дунае (до Рени), в морских портах Черноморского бассейна, а также в морских мелководных портах Азовского бассейна, таких как Ростов-на-Дону, Азов, Ейск, Таганрог, Темрюк, Кавказ, Мариуполь и Бердянск.

На выбор главных размерений судов смешанного плавания влияют как путевые условия внутренних водных путей (ВВП), так и условия морских портов и каналов.

В соответствии с ГОСТ 26775-97 [5] все внутренние водные пути в зависимости от их характеристик и использования транспортным и техническим флотом подразделяют на семь классов, указанных в табл. 1.

Такая классификация позволяет, исходя из класса выбранного ВВП, оценить примерные размеры (габаритную длину  $L_M$ , габаритную ширину  $B_M$ , надводный габарит  $H_{НГ}$ ) судов и барже-буксирных составов (ББС), для которых эти пути проектировались.

Таблица 1

*Основные характеристики водных путей  
и транспортного грузового флота*

Номер	Класс водного пути (участка)	Глубина судового хода на перспективу $d_{ВВП}$ , м		Расчетные ширина $B_M$ / длина $L_M$ состава, м		Расчетная надводная высота судна $H_{НГ}$ , м
		гарантированная	средненавигационная	судового	плотового	
1	сверх-магистральные	>3,2	>3,4	36/220 или 29/280	110/830 или 75/950	15,2
2		2,5... 3,2	2,9... 3,4	36/220	75/950	13,7
3	магистральные	1,9... 2,5	2,3... 2,9	21/180	75/680	12,8
4		1,5... 1,9	1,7... 2,3	16/160	50/590	10,4
5	местного значения	1,1... 1,5	1,3... 1,7	16/160	50/590	9,6
6		0,7... 1,1	0,9... 1,3	14/140	30/470	9,0
7		<0,7	0,6... 0,9	10/100	20/300	6,6

*Источник: [5]*

Однако такая классификация является весьма условной и ее использование в проектировании без привязки к фактическим путевым условиям невозможно. Например, согласно табл. 1 река Днепр относится по глубине судового хода к ВВП первого класса (нижний и средний Днепр), а по габаритным размерам судов – четвертого класса.

Согласно [11] фактическая обеспеченность гарантированных судовых глубин составляет в зависимости от категоричности ВВП от 80 до 99 %, что также подчеркивает достаточно условный характер классификации ГОСТ 26775-97.

Итак, изложим требования к главным элементам, связанные с ограничениями портов, каналов и судоходных путей.

1. Требования к габаритной длине судна  $L_M$

1.1. По габаритам шлюзов

Согласно правилам пропуска судов [24], габаритная длина судна  $L_M \leq L_{шк}$ , где  $L_{шк}$  – полезная длина шлюзовой камеры.

Данные реки Днепр указаны в табл. 2.

Таблица 2

*Полезные длины шлюзовых камер  $L_{шк}$  на Днепре*

Шлюзы	Фактическая длина $L_{шк}$ , м
Киевский	150
Каневский	270
Кременчугский	260
Днепродзержинский	270
Запорожский	283
Каховский	260

*Источник: [13-19]*

1.2. По минимальному радиусу закругления судового хода ВВП

Габаритная длина судна по критерию безопасной управляемости судна на ВВП без снижения скорости должна удовлетворять условию  $L_M \leq K_1 R_{min}$ , где  $R_{min}$  – минимальный радиус закругления судового хода (800 м для реки Днепр [13-19]),  $K_1$  – коэффициент запаса. В виду отсутствия конкретных величин в Правилах плавания по ВВП Украины [22], выбирается в соответствии с Правилами плавания по внутренним водным путям РФ [21] (см. табл. 3)  $L_M \leq 0,29 \cdot 800 \leq 232$  м .

Таблица 3

*Коэффициенты запаса  $K_1$  для определения  
максимально допускаемой габаритной длины судна*

Наименование судна	Направление движения	
	вверх	вниз
Одинокные суда	0,40	0,33
Толкаемые составы	0,40	0,29
Суда и составы на ВВП США [10]	0,95	0,75

*Источник: [10, 21]*

Следует отметить, что коэффициенты, приведенные в табл. 4, базируются на эксплуатационных условиях реки Волга со скоростью течения 4 км/ч, однако, эти коэффициенты распространяются на все реки. На самом деле это некорректно, так как радиусы кривизны и ширины судового хода, а также скорости течения на равнинных реках существенно отличаются друг от друга. Отношение радиуса кривизны к ширине судового хода на большей части Волги составляет 10-12, на Днестре 7-8 (10 – очень редко) [23]. Отсюда видно, что относительная ширина судового хода на Днестре больше, чем на Волге. Это позволяет водить составы со значительно меньшими соотношениями радиуса кривизны судового хода к длине состава ( $R/L$ ). Кроме того, скорости течения на Днестре значительно меньше (на Днестре до 2,5 км/ч [23], на Волге – до 7 км/ч [2]), чем на Волге, что в свою очередь вызывает дальнейшее снижение отношения  $R/L$ .

Полученное выше значение  $L_M$  можно трактовать как величину с запасом в безопасную сторону.

### 1.3. По длинам причалов портов

С целью исключения перешвартовок при проведении грузовых операций габаритная длина судна согласно рекомендаций [11] не должна превышать длину причала с учетом запаса на передвижку судна и на навигационный запас, т.е. должна удовлетворять в общем виде условию  $L_M \leq L_{\text{ПР}} - \Delta L_1 - \Delta L_2$ , где  $L_{\text{ПР}}$  – длина причала, что требует изучения фактических данных по портам [1, 4, 21, 26];  $\Delta L_1$  – длина передвижки судна, причем при передвижных кранах  $\Delta L_1 = 0$ , при погрузке стационарными перегрузочными механизмами  $\Delta L_1 = 0,15 \cdot L_M$ ,  $\Delta L_2 = 0 \dots 0,30 \cdot L_M$  – запас на предотвращение навигационных аварий.

Для причалов, где используются передвижные краны, условие имеет вид  $L_M \leq (0,77 \dots 1,00) \cdot L_{\text{ПР}}$ .

Для причалов со стационарными грузовыми механизмами условие по длинам причалов имеет вид  $L_M \leq (0,62 \dots 0,85) \cdot L_{\text{ПР}}$ .

Длины причалов портов указаны в таблице 4.

В среднем для исследуемого региона  $L_{\text{ПР}} = 120 \dots 350$  м.

Таблиця 4

*Длины причалов портов  $L_{\text{ПР}}$*

Порт	Фактическая длина $L_{\text{ПР}}$ , м
Киевский речной	от 130
Черкасский речной	70-180
Кременчугский речной	от 120
Днепродзержинский речной	до 150
Днепропетровский речной	120-230
Запорожский речной	72-420
Никопольский речной	110, 200
Новокаховский речной	100-140
Херсонский речной	150-550
Николаевский речной	от 140
Ренийский морской торговый	от 80. Суммарная – 3927.
Измаильский морской торговый	до 150
Усть-Дунайский морской торговый	117, 150
Белгород-Днестровский морской торговый	78,7-185
Ильичевский морской торговый	от 120
Одесский морской торговый	87-359
Южный морской торговый	103-350
Херсонский морской торговый	80-200
Николаевский морской торговый	138-265
Октябрьский морской	Суммарная – 1900.
Днепро-Бугский морской	100-210
Скадовский морской торговый	156-294
Евпаторийский морской торговый	134-305
Севастопольский морской торговый	112, 251,5
Ялтинский морской торговый	195, 280
Феодосийский морской торговый	86,25-165
Керченский морской торговый	150-400
Бердянский морской торговый	132,7-217
Мариупольский морской торговый	145,5-265,5
Таганрогский морской торговый	70-214,5
Темрюк	84-182
Тамань	150-285
Кавказ	150, 169
Ростов-на-Дону	до 500
Азов	50-330
Ейск	101,1-175,2

*Источник: [27-30]*

#### 1.4. По характеристикам морских каналов

Для обеспечения безопасного проходов судов морскими каналами администрациями каналов вводятся специальные ограничения в виде  $L_M \leq L_{KM}$ , где  $L_{KM}$  – максимально допускаемая длина судна для совершения прохода в тех или иных условиях (круглосуточно или без лоцмана и т.п.).

К примеру, согласно [32], для Керчь-Еникальского канала установлены ограничения по критерию круглосуточного прохода с лоцманом  $L_{KM} = 160$  м, по безлоцманскому проходу –  $L_{KM} = 120$  м.

При этом проход судов в Азовское море осуществляется в светлое время суток судам длиной до 215 м и осадкой до 8 м, в любое время – длиной до 160 м и осадкой до 6 м. Для судов длиной более 120 м и с осадкой более 4,5 м требуется лоцманская проводка.

#### 1.5. По габаритам акватории речных внерусловых портов

При необходимости расположить причалы вне русла реки строятся внерусловые порты в естественных или искусственно созданных бассейнах, например, Ростовский ковш, Александровский ковш, ковш Аксайской РЭБ и т.п.

При выборе ширины акватории (бассейна)  $B_{БАС}$  внеруслового порта согласно рекомендаций [11] должно выполняться условие  $B_{БАС} \geq 1,5 \cdot L_M + k_{ПР} \cdot B_M$ , где  $k_{ПР}$  – коэффициент расположения причалов, при нахождении причалов с одной стороны акватории  $k_{ПР} = 0$ , с двух сторон –  $k_{ПР} = 2$ ;  $B_M$  – габаритная ширина судна.

Отсюда габаритная длина судна должна соответствовать условию  $L_M \leq 0,67 \cdot (B_{БАС} - k_{ПР} \cdot B_M)$ . Для односторонней акватории ограничение приобретает вид  $L_M \leq 0,67 \cdot B_{БАС}$ , для двухстороннего внеруслового порта при ожидаемом соотношении  $L_M / B_M \approx 142 / 18 = 7,9$  – условие трансформируется к виду  $L_M \leq 0,57 \cdot B_{БАС}$ .

#### 1.6. По размерам подходов к судоходным шлюзам

В связи со стесненными условиями вход и выход судов в камеру шлюза должен осуществляться в движении по прямой линии. При этом рекомендуется, чтобы прямолинейный участок подхода к шлюзу имел такую протяженность  $L_{ПШ}$ , которая позволила бы обеспечить расхождение судов и отстой судов, ожидающих шлюзование.

Анализ рекомендаций [11] позволил получить ограничение по габаритной длине судна в виде  $L_M \leq 0,26 \cdot L_{ПШ}$ , которое позволяет выполнить все требования по безопасному несимметричному подходу расчетного судна к шлюзу при радиусе поворота судна  $R_{min} \leq 3L_M$  и ожидаемом соотношении  $L_M / B_M = 7,9$ .

### 1.7. По основным элементам морских портов

Согласно [12] для устранения опасности выброса судна на огражденные сооружения ширина входных ворот порта (проекция расстояния между головами огражденных сооружений на нормаль к оси входа в порт)  $B_{\text{ВХ}}$  должна удовлетворять условию  $B_{\text{ВХ}} \geq 0,8L_{\text{М}}$ , что равносильно ограничению  $L_{\text{М}} \leq 1,25B_{\text{ВХ}}$ .

Считается, что происходит полное гашение инерции судна при входе в порт при выполнении условия  $L_{\text{М}} \leq 0,29L_{\text{ВХ}}$ , где  $L_{\text{ВХ}}$  – длина прямолинейного участка портовой акватории по направлению оси входа, считая от ворот порта.

Разворот судна собственными средствами на необходимый угол по дуге циркуляции требует наличия разворотного круга, отвечающего условию  $L_{\text{М}} \leq 0,29D_{\text{ВХ}}$ , где  $D_{\text{ВХ}}$  – диаметр разворотного круга. При использовании буксиров допускается  $L_{\text{М}} \leq 0,50D_{\text{ВХ}}$ . Аналогичные решения были приняты при проектировании порта Роттердам [20].

Согласно [12] для безопасных швартовых операций у причалов, акватория которых допускает разворот судна, при ожидаемом соотношении  $L_{\text{М}}/B_{\text{М}} = 7,9$  должно выполняться условие  $L_{\text{М}} \leq 0,61B_{\text{БАС}}$ , где  $B_{\text{БАС}}$  – ширина бассейна (акватории между пирсами).

## 2. Габаритная ширина судна $B_{\text{М}}$

### 2.1. По габаритам судового хода

Ширина судна должна позволять в рамках фактической ширины судового хода  $B_{\text{СХ}}$  обеспечивать безопасные условия плавания с учетом воздействия ветра, волнения, установленного порядка движения.

Используя рекомендации работы [11], значение габаритной ширины судна может быть определено по условию  $B_{\text{М}} \leq k_2 \cdot B_{\text{СХ}}$ , где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий условия плавания. Для одностороннего движения  $k_2 = 0,67$ , для двухстороннего движения без учета рыскания судов  $k_2 = 0,38$ , для двухстороннего движения с учетом максимального рыскания судов на угол до 2 градусов  $k_2 = 0,35$ . Данные рекомендации могут быть ужесточены для скальных откосов и подводных прорезей, которых судоводители не видят.

Судовой ход на Днестре имеет гарантированную ширину  $B_{\text{СХ}} = 80$  м, глубину не менее 3,2 м. Поэтому для одностороннего движения  $B_{\text{М}} = 0,67 \cdot 80 = 53,6$  м и для двухстороннего движения  $B_{\text{М}} = 0,38 \cdot 80 = 30,4$  м.

## 2.2. По габаритам шлюзов

Согласно правилам пропуска судов [24], габаритная ширина судна должна отвечать условию  $B_M \leq B_{\text{шк}} - \Delta B_1$ , где  $B_{\text{шк}}$  – фактическая ширина шлюзовой камеры;  $\Delta B_1$  – запас по ширине, в шлюзах шириной до 18 м составляет 0,8 м. При наличии наледей на стенах камеры в шлюзах любой ширины шлюзование судов допускается при суммарном запасе по ширине не менее  $\Delta B_1 = 0,4$  м от краев наледи.

Значения ширины камеры для шлюзов Днепра указаны в табл. 5.

Таблица 5

*Полезная ширина шлюзовой камеры  $B_{\text{шк}}$  Днепра*

Шлюзы	Фактическая ширина $B_{\text{шк}}$ , м
Киевский	18,0
Каневский	18,0
Кременчугский	18,0
Днепродзержинский	18,0
Запорожский	18,0
Каховский	18,0

*Источник: [13-19]*

## 2.3. По проходу под мостами

По проходу под мостами габаритная ширина судна  $B_M \leq B_{\text{мс}} - \Delta B_2$ , где  $B_{\text{мс}}$  – фактическая ширина подмостовых габаритов (минимальная согласно ГОСТ 26775-97 [5] указана в табл. 6);  $\Delta B_2$  – запас по ширине, принимаемый для мостов на водных путях классов 1-4 равным 24 м.

Таблица 6

*Минимальная ширина подмостовых габаритов  
судоходных пролетов мостов*

Класс водного пути (участка)	Ширина подмостового габарита, не менее $B_{\text{мс}}$ , м, для пролета	
	неразводного	разводного
1	140	60
2	140	60
3	120	50
4	120	40
5	100/60	30
6	60/40	-
7	40/30	-

*Источник: [5]*

Согласно с «Правилами плавания на ВВП Украины» [22] ширина судоводных пролетов, в условиях ограниченной видимости менее 1 км, должна быть не меньше:

- пятикратной ширины однопиточного (кильватерного) состава;
- трехкратной ширины иных составов, кроме однопиточного.

Основные ограничивающие габаритную ширину мосты на Днепре указаны в таблице 7.

*Таблица 7*

*Основные ограничивающие габаритную ширину мосты на Днепре*

Мосты	Ширина судоводного пролета / судоводных пролетов, м
Метро на 850,6 км судоводного хода	60 / 60
Черкасский на 667 км судоводного хода	90 / 90
Кременчугский на 541,2 км судоводного хода	80 / 80
Днепропетровский двухъярусный на 391,7 км судоводного хода	65 / 65 / 65
Запорожский на 210,5 км судоводного хода	80
Херсонский автодорожный на 37,4 км судоводного хода	80 / 80

*Источник: [13-19]*

Кроме указанного в табл. 7 Днепропетровского двухъярусного моста, на участке от Днепродзержинска до Днепропетровска имеется пять других мостов, имеющих большие габариты:

- Днепродзержинский автодорожный мост (ширина судоводного пролета 100 м);
- Новокайдацкий мост (ширина судоводного пролета 80 м);
- Меремо-Херсонский мост (ширина судоводного пролета 86 м);
- Южный автодорожный мост (ширина судоводного пролета 120 м);
- Днепропетровский городской мост (ширина судоводного пролета 80 м).

#### 2.4. По габаритам акватории речных русловых портов

Большинство причалов р. Днепр расположены непосредственно в русле и рукавах, вдоль берега.

Для таких портов должно выполняться условие по достаточности ширины акватории (ширины реки)  $B_{\text{БАС}}$  для стоянки у причалов двух рядов судов шириной  $B_{\text{М}}$  и безопасного расхождения двух встречных судов также шириной  $B_{\text{М}}$ . Согласно рекомендациям [10] ограничение имеет вид  $B_{\text{БАС}} \geq 6 \cdot B_{\text{М}}$ .

Соответственно, значение габаритной ширины судна может быть определено по условию  $B_{\text{М}} \leq 0,17 \cdot B_{\text{БАС}}$ .

## 2.5. По основным элементам морских портов

Согласно [12] для безопасных швартовных операций у причалов, акватория которых не допускает разворот судна, должно выполняться условие  $B_M \leq 0,50(B_{\text{БАС}} - 60)$ , где  $B_{\text{БАС}}$  – ширина бассейна (акватории между пирсами). При этом принято, что сумма длины наибольшего буксира и длины буксирного троса составляет примерно 60 м.

## 2.6. По подходным каналам морских портов

Согласно [12] ширина канала по дну на отметке навигационной глубины при одностороннем движении  $B_{\text{СХ}} = k_3 \cdot B_M + 2C + \Delta B_3$ , где  $k_3 \cdot B_M$  – ширина маневровой полосы для расчетного судна,  $k_3$  – коэффициент, учитывающий влияние на движение судна ветра и течения, а также парусность судна и его скорость,  $C = 0,5 \cdot B_M$  – навигационный запас ширины канала, учитывающий гидродинамическое взаимодействие судна с бровкой канала,  $\Delta B_3$  – запас ширины канала на заносимость. Отсюда ширина судна должна удовлетворять ограничению  $B_M \leq (B_{\text{СХ}} - \Delta B_3) / (k_3 + 1)$ .

Например, для мурманского рукава порта Архангельск  $B_M \approx 0,16 \cdot B_{\text{СХ}}$ .

Для порта Роттердам согласно данным [20] действует оценка в виде  $B_M \approx 0,20 \dots 0,33 \cdot B_{\text{СХ}}$ .

## 3. Осадка судна $d$

### 3.1. По правилам плавания на ВВП

Согласно «Правилам» [21] осадка судна  $d \leq d_{\text{ВВП}} - \Delta d_1$ , где  $d_{\text{ВВП}}$  – глубина судового хода;  $\Delta d_1$  – запас по глубине, который зависит от значения  $d_{\text{ВВП}}$  и типа грунта.

$\Delta d_1$  показывает разницу между глубиной на конкретном участке и наибольшей осадкой судна на стоянке и назначается согласно табл. 8.

Требуется, чтобы при прохождении лимитирующих по глубине участков судоводители учитывали явления просадки и принимали меры для ее уменьшения путем снижения скорости судна или путем уменьшения загрузки. Кроме того, при плавании в бассейнах разрядов "М" и "О" суда должны иметь дополнительный запас воды под днищем не менее 1/3 высоты волны согласно прогнозу. При проектировании такие факторы не учитываются, так как подобные динамические эффекты увеличения осадки должны быть учтены при эксплуатации.

Таблиця 8

*Минимальные запасы  $\Delta d_1$  по глубине на водных путях  
(минимальные запасы воды под днищем)*

Глубина судового хода $d_{\text{ввп}}$ , м	Для судов (составов)		Для плотов независимо от характера грунта, м
	при песчаном и галечном грунте, м	при каменистом грунте, м	
до 1,50	0,10	0,15	0,20
1,51-3,00	0,15	0,20	0,25
3,00 и более	0,20	0,25	0,30

*Источник: [21]*

На участке Киевского водохранилища от устья реки Припять до Киевской ГЭС самым сложным для судоходства является участок Киевская ГЭС – село Толокунь (877-910 км судового хода). Максимальная глубина на этом участке составляет 16,9 м. Средняя глубина водохранилища – 4 м. Гарантированная глубина судового хода – 2,65 м. На участке Каневского водохранилища от Киевской ГЭС до Каневской ГЭС самым сложным для судоходства является участок Киевский шлюз – город Украинка (871-812 км судового хода). На участке расположено 7 мостов. На участке Каневского водохранилища от города Канев до города Переяслав-Хмельницкий глубины на судовом ходу изменяются от 6 до 22 м; от Переяслав-Хмельницкого до Украинки – от 4,3 до 15 м; от Украинки до Вышгорода – от 4 до 20,9 м. Гарантированная глубина судового хода – 3,65 м (участок Каневский шлюз – вход в Киевскую гавань), 2,65 м (участок Киевский шлюз – вход в Киевскую гавань). На участке Кременчугского водохранилища от Каневской ГЭС до Кременчугской ГЭС самым сложным для судоходства является участок Каневский шлюз – поселок Сокирна (726-683 км судового хода). На участке от поселка Сокирна до острова Заповедник 14 скалистых перекатов, на которых глубины могут быть меньше гарантированной. Гарантированные габариты пути поддерживаются систематическими дноуглубительными работами. Актуальную обстановку необходимо уточнять у ДП «Укрводшлях». Для всего участка характерны резкие колебания уровней воды и наблюдаются значительные скорости течений, которые являются результатом работы Каневской ГЭС (1-2 м/с в период весеннего половодья, 0,5-0,8 м/с во время сбросов ГЭС). На участке от Кременчугской ГЭС до Черкасского моста глубины меняются от 5 до 13 м. Наименьшие глубины (3,8 м) наблюдаются на участке между буями № 9 и № 11. Гарантированная глубина судового хода – 3,65 м.

На участке Днепродзержинского водохранилища самым сложным для судоходства является участок Кременчугская ГЭС – Пятихатский гранитный карьер (555-499 км судового хода). Имеется ряд перекатов, на которых глубины могут быть меньше гарантированной. Гарантированные

габариты пути поддерживаются систематическими дноуглубительными работами. Актуальную обстановку необходимо уточнять у ДП «Укрводшлях». На участке от Днепродзержинской ГЭС до поселка Мишурин Рог глубины на судовом ходу меняются от 4 до 14 м; на участке от поселка Мишурин Рог до поселка Каменные потоки – от 4 до 10 м. Гарантированная глубина судового хода – 3,65 м.

На участке Днепровского водохранилища самым сложным для судоходства является участок Днепродзержинская ГЭС – Днепропетровск (433-385 км судового хода). Участок от буя № 53 до Днепродзержинского шлюза особенно опасен из-за перекатов и каменистого грунта. На участке от Днепровской ГЭС им. В.И. Ленина до устья Самары глубины на судовом ходу меняются от 4,4 до 62 м; на участке от устья Самары до Днепродзержинской ГЭС – от 3,65 до 11 м. Гарантированная глубина судового хода – 3,65 м.

На участке Каховского водохранилища от Днепровской ГЭС до Каховской ГЭС самым сложным для судоходства является участок Днепровская ГЭС – село Беленькое (305-271 км судового хода). На этом участке имеется несколько крутых поворотов, которые ограничивают видимость. В районе Запорожья возможная глубина пути может быть на уровне 3,2 м. На участке от Каховской ГЭС до села Бабино глубины на судовом ходу меняются от 9 до 15 м; на участке от села Бабино до порта Никополь – от 3,7 до 10 м, от порта Никополь до села Беленькое – от 3,2 до 14 м, от села Беленькое до Днепровской ГЭС – от 3,2 до 8,4 м. Средняя глубина водохранилища – 8,5 м. Гарантированная глубина судового хода – 3,65 м, на участке Старого Днепра (гранкарьер – устье) – 3 м. На участке Нижнего Днепра от Каховской ГЭС до устья самым сложным для судоходства является участок Каховская ГЭС – село Львово (305-271 км судового хода). На этом участке имеются перекаты с возможными лимитирующими глубинами (менее 3,65 м, необходимо уточнять перед рейсом у ДП «Укрводшлях»). Средняя глубина на участке от Херсона до устья Днепра – 8 м. Гарантированная глубина судового хода – 3,65 м.

### 3.2. По условиям шлюзов

Согласно правилам пропуска судов [24] фактическая осадка  $d \leq d_{\text{шп}} - \Delta d_2$ , где  $d_{\text{шп}}$  – глубина на порогах шлюза;  $\Delta d_2$  – запас по глубине (0,40 м). Гарантированная глубина на верхнем и нижнем порогах камер шлюзов составляет 3,65 м.

### 3.3. По глубинам подходных каналов морских и речных портов

Согласно [12] проектная глубина канала  $d_{\text{КАН}} = d + \Delta d_3 + \Delta d_4$ , где  $\Delta d_3$  – навигационный запас глубины канала, учитывающий просадку судна на ходу, волнение, крен от ветра и циркуляции, а также собственно

запас, необходимый для обеспечения управляемости судна на мелководье,  $\Delta d_4$  – запас глубины канала на заносимость.

Отсюда наибольшая осадка судна должна удовлетворять ограничению  $d = d_{\text{КАН}} - \Delta d_3 - \Delta d_4$ . Рекомендации по минимальному навигационному запасу глубины канала даны в табл. 9 [30].

*Таблица 9*

*Минимальный навигационный запас глубины канала*

Грунт	Значение запаса $\Delta d_3$ , м
Ил	0,04d
Песок заиленный, ракушка, гравий	0,05d
Песок, глина, супесь, суглинки, галька	0,06d
Скальный грунт, валуны, сцементированные породы	0,07d

*Источник: [30]*

Минимальные глубины подходных каналов портов указаны в таблице 10.

*Таблица 10*

*Минимальные глубины подходных каналов портов*

Порт	Минимальные глубины подходных каналов $d_{\text{КАН}}$ , м
1	2
Киевский речной	3,4
Черкасский речной	3,6
Кременчугский речной	3,8
Днепродзержинский речной	3,5
Днепропетровский речной	4,0
Запорожский речной	4,2
Никопольский речной	3,2-5,0
Новокаховский речной	3,8
Херсонский речной	4,4-8,0
Николаевский речной	5,8
Ренийский морской торговый	2,3-6,5
Измаильский морской торговый	7,2
Усть-Дунайский морской торговый	8,0
Белгород-Днестровский морской торговый	4,5
Ильичевский морской торговый	16,0
Одесский морской торговый	13,5
Южный морской торговый	14,0-25,0
Херсонский морской торговый	3,7-8,25
Николаевский морской торговый	7,5-11,2

Продолжение табл.10

1	2
Октябрьский морской	10,7
Днепро-Бугский морской	11,5
Скадовский морской торговый	до 10,0
Евпаторийский морской торговый	5,0-8,25
Севастопольский морской торговый	5,75-9,75
Ялтинский морской торговый	6,5-8,25
Феодосийский морской торговый	6,8-10,9
Керченский морской торговый	6,7-8,4
Бердянский морской торговый	5,4-8,37
Мариупольский морской торговый	8,0-9,75
Таганрогский морской торговый	4,2-5,5
Темрюк	4,6-5,5
Тамань	5,5-14,5
Кавказ	3,9-5,8
Ростов-на-Дону	3,6-6,7
Азов	4,5-8,5
Ейск	3,8-4,8

*Источник:* [27-29]

В среднем для исследуемого региона  $d_{\text{кан}} = 3,8-8,0$  м.

#### 4. Ограничения по надводному габариту

##### 4.1. По проходу под мостами

Согласно правилам плавания судов по ВВП [21] фактическая надводная высота судна должна отвечать условию  $H_{\text{нг}} \leq H_{\text{мс}} - \Delta H_1$ , где  $H_{\text{мс}}$  – высота моста над фактическим уровнем воды,  $\Delta H_1$  – минимальный запас по высоте, который зависит от  $H_{\text{мс}}$  и характера ВВП (свободное течение или зарегулированные участки).

Минимальные запасы по высоте  $\Delta H_1$  для прохода под мостами указаны в табл. 11 без учета волнения.

Минимальное значение  $H_{\text{мс}}$  определяется по данным табл. 12 ГОСТ 26775-97 [5] в зависимости от класса ВВП и использования транспортным и техническим флотом.

Основные ограничивающие габаритную высоту мосты на Днестре приведены в табл. 13.

Таблиця 11

*Минимальные запасы  $\Delta H_1$  по высоте в мостах*

Высота моста над рабочим (фактическим) уровнем воды $H_{MC}$ , м	На свободных реках и водохранилищах, м	На зарегулированных участках, м
до 10	0,2	0,1
10,1-13,0	0,3	0,1
13,1-16,0	0,4	0,2
16,0 и более	0,5	0,2

*Источник: [21]*

Таблиця 12

*Высота подмостового габарита*

Класс водного пути (участка)	Высота подмостового габарита $H_{MC}$ , м
1	17,0
2	15,0
3	13,5
4	12,0
5	10,5
6	9,5
7	7,0

*Источник: [5]*

Таблиця 13

*Основные ограничивающие габаритную высоту мосты на Днепре*

Мосты	Высота моста над рабочим (фактическим) уровнем воды, м
Метромост на 850,6 км судового хода	14,38
Черкасский на 667 км судового хода	13,20
Кременчугский на 541,2 км судового хода	9,65 (8 пролет) / 9,80 (9 пролет) разводной
Новокайдацкий на 396,4 км судового хода	15,70
Днепропетровский двухъярусный на 391,7 км судового хода	8,67 (6 пролет, движение вниз) / 8,77 (8 пролет, движение вверх) / 9,25 (7 пролет, разводной)
Днепропетровский городской на 389,3 км судового хода	14,90
Южный автодорожный на 380,6 км судового хода	16,70
Запорожский на 210,5 км судового хода	22,60
Херсонский автодорожный на 37,4 км судового хода	17,20

*Источник: [13-19]*

#### 4.2. Пересечения воздушных линий электропередачи

Согласно [11] фактическая надводная высота судна должна отвечать условию  $H_{\text{нг}} \leq H_{\text{эп}} - \Delta H_2$ , где  $H_{\text{эп}}$  – наименьшее расстояние проводов воздушных линий от фактического уровня воды,  $\Delta H_2$  – минимальный запас по высоте, который зависит от напряжения в линии электропередачи согласно табл. 14.

Наиболее важные для исследуемого бассейна переходы указаны в табл. 15, на реке Днепр линии электропередач проходят значительно выше существующих мостов, отмеченных в табл. 13. Переход аммиакопровода на 337,8 км судового хода по Днепру имеет надводный габарит 17,27 м.

Таблица 14

*Минимальный запас по высоте  $\Delta H_2$  для прохода под проводами воздушных линий согласно [31]*

Расстояние $\Delta H_2$ , м от проводов воздушной линии	Напряжение воздушной линии, кВ				
	110	150	220	330	500
До верхних частей судов при наивысшем уровне воды	2,0	2,5	3,0	3,5	4,5

*Источник: [31]*

Таблица 15

*Наименьшее расстояние проводов воздушных линий от фактического уровня воды  $H_{\text{эп}}$  нижней части р. Дон (устье – порт Ростов-на-Дону)*

Участок р. Дона, отстояние от Южного порта Москвы, км	Высота перехода $H_{\text{эп}}$ , м от	
	проектного уровня	максимального уровня
3155,4	23,6	21,4
3132,3	17,5	14,0

*Источник: [1]*

Сводные результаты анализа максимально допускаемой габаритной длины приведены в табл. 16, максимально допускаемой ширины – в табл. 17, осадки – в табл. 18 и надводного габарита – в табл. 19.

Таблиця 16

*Путевые условия, влияющие на выбор габаритной длины  $L_M$  судна «Днепр-Макс» класса*

Характеристика	Максимально возможное значение $L_M$
Минимальный радиус закругления судового хода реки Днепр $R_{min} = 350$ м	$L_M \approx 232$ м
Длины причалов $L_{пр} = 120-350$ м	120 м (для грузовой секции состава), 140 м для самоходного судна
Ограничение Керчь-Еникальского канала по критерию круглосуточного прохода	160 м
Минимальная длина рабочей камеры шлюза $L_{шк} = 150$ м	150 м (при эксплуатации выше Киевского шлюза), 260 м (при эксплуатации до Киевского шлюза)

Таблиця 17

*Путевые условия, влияющие на выбор габаритной ширины  $B_M$  судна «Днепр-Макс» класса*

Характеристика	Максимально возможное значение $B_M$
Река Днепр, ширина судового хода $B_{сх} = 80$ м	30,4 м
Порт Ростов-на-Дону, ширина судового хода $B_{сх} = 60$ м	21,0 м
Порт Азов, ширина судового хода Азово-Донского канала $B_{сх} = 70$ м	24,5 м
Порт Ейск, ширина судового хода $B_{сх} = 80$ м	28,0 м
Порт Темрюк	17,5 м
Минимальная ширина подмостовых габаритов на Днепре $B_{мс} = 65$ м (Днепровский двухъярусный мост, 391,7 км судового хода)	20,0 м (при разводке моста в ясную погоду), 13,0 м (для однониточного состава в условиях ограниченной видимости)
Минимальная ширина иных подмостовых габаритов на Днепре $B_{мс} = 80$ м	28,0 м (при разводке мостов в ясную погоду), 16,0 м (для однониточного состава в условиях ограниченной видимости, при наличии дополнительных подруливающих устройств возможная ширина 16,8-17,2 м)
Минимальная ширина камеры шлюзов на Днепре $B_{шк} = 18,0$ м	17,2 м (без учета наледи)

Таблиця 18

*Путевые условия, влияющие на выбор осадки  $d$   
судна «Днепр-Макс» класса*

Характеристика портов	Максимально возможное значение $d$
1	2
Река Днепр, глубина судового хода $d_{\text{ВВП}} = 3,2-3,85$ м	3,00-3,65 м
Шлюза на Днепре, глубина на верхнем и нижнем порогах камер $d_{\text{ШП}} = 3,65$ м	3,25 м
Киевский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 3,4$ м	3,20 м
Черкасский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 3,6$ м	3,40 м
Кременчугский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 3,8$ м	3,60 м
Днепродзержинский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 3,5$ м	3,30 м
Днепропетровский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 4,0$ м	3,80 м
Запорожский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 4,2$ м	4,00 м
Никопольский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 3,2-5,0$ м	3,00-4,80 м
Новокаховский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 3,8$ м	3,60 м
Херсонский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 4,4-8,0$ м	4,20-7,80 м
Николаевский речной порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 5,8$ м	5,60 м
Ренийский морской торговый порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 2,3-6,5$ м	2,10-6,50 м
Измаильский морской торговый порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 7,2$ м	7,00 м
Белгород-Днестровский морской торговый порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 4,5$ м	4,30 м
Херсонский морской торговый порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 3,7-8,25$ м	3,50-8,05 м
Николаевский морской торговый порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 7,5-11,2$ м	7,30-11,0 м
Евпаторийский морской торговый порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 5,0-8,25$ м	4,80-8,05 м
Керченский морской торговый порт, глубина судового хода $d_{\text{КАН}} = 6,7-8,4$ м	6,5-8,2 м

Продолжение табл. 18

1	2
Бердянський морський торговий порт, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 5,4-8,37$ м	5,2-8,17 м
Маріупольський морський торговий порт, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 8,0-9,75$ м	7,80-9,55 м
Таганрогський морський торговий порт, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 4,2-5,5$ м	4,00-5,30 м
Темрюк, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 4,6-5,5$ м	4,40-5,30 м
Тамань, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 5,5-14,5$ м	5,30-14,30 м
Кавказ, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 3,9-5,8$ м	3,70-5,60 м
Ростов-на-Дону, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 3,6-6,7$ м	3,40-6,50 м
Азов, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 4,5-8,5$ м	4,30-8,30 м
Ейск, глибина судового ходу $d_{\text{КАН}} = 3,8-4,8$ м	3,60-4,60 м

Таблиця 19

*Путевые условия, влияющие на выбор надводного габарита  $H_{\text{НГ}}$   
судна «Днепро-Макс» класса*

Характеристика	Максимально возможное значение $H_{\text{НГ}}$
1	2
Мост Метро на 850,6 км судового хода, $H_{\text{МС}} = 14,38$ м	13,98 м
Черкасский мост на 667 км судового хода, $H_{\text{МС}} = 13,2$ м	12,80 м
Кременчугский мост на 541,2 км судового хода, $H_{\text{МС}} = 9,65/9,80$ (разводной пролет) м	9,15 м/ 9,30 м
Новокайдацкий мост на 396,4 км судового хода $H_{\text{МС}} = 15,7$ м	15,30 м
Днепропетровский двухъярусный мост на 391,7 км судового хода, $H_{\text{МС}} = 8,67$ (неразводной пролет) м/8,77 (неразводной) м/9,25 (разводной) м	8,57 м/ 8,67 м/ 9,15 м
Днепропетровский городской мост на 389,3 км судового хода, $H_{\text{МС}} = 14,9$ м	14,50 м

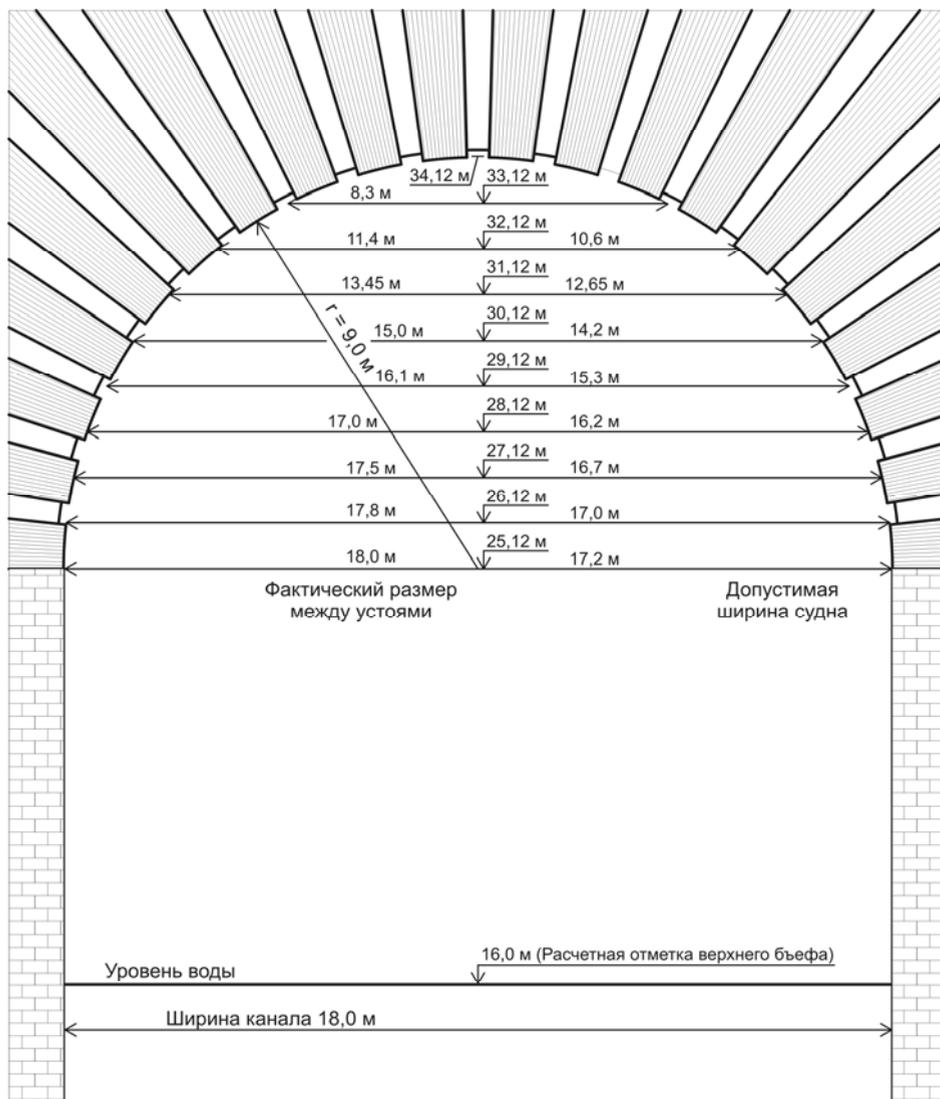
Продолжение табл. 19

1	2
Южный автодорожный мост на 380,6 км судового хода, $H_{MC} = 16,7$ м	16,20 м
Запорожский мост на 210,5 км судового хода, $H_{MC} = 22,6$ м	22,10 м
Херсонский автодорожный мост на 37,4 км судового хода, $H_{MC} = 17,2$ м	16,70 м
Автодорожный и железнодорожный мост (Дон), 3142,4 км, $H_{MC} = 19,7$ м	19,20 м
Переход аммиакопровода на 337,8 км судового хода по Днепру, $H_{ам} = 17,27$ м	16,77 м
Воздушный переход реки Дон, 3132,3 км, высота перехода $H_{эп} = 17,5$ м	14,00 м
Воздушный переход реки Дон, 3155,4 км, высота перехода $H_{эп} = 23,6$ м	20,10 м
Примечание.* – При эксплуатации выше Кременчуга $H_{нг} = 12,80$ м. При эксплуатации выше Запорожья $H_{нг} = 14,50$ м (Днепропетровский, Днепродзержинский речные порты и до Кременчуга). При эксплуатации до Запорожья $H_{нг} = 16,70$ м. Проектируемое судно класса «Днепро-Макс» не предназначено для работы выше 3133 км реки Дон. В случае создания судна, которое должно было бы работать на расположенный выше Александровский ковш (3123, 6 км), $H_{нг} = 14,0$ м.	

Кроме того, необходимо принять во внимание надводные габариты арки шлюза Каховской ГЭС (см. рис.). Особенность арки заключается в том, что закругления арки не позволяют использовать габаритную ширину шлюза в 18 м по всей высоте арке (18 м над уровнем воды в шлюзе), таким образом, необходимо будет предусмотреть рулевую рубку с открытыми крыльями мостика во избежание перекрытия надстройки и арки шлюза (более детально необходимо уточнять после выбора надводного габарита судна).

**Заключение.** На основе анализа путевых условий можно рекомендовать для судна смешанного река-море плавания «Днепро-Макс» класса габаритную длину 140-150 м (длину грузовой секции ББС не более 120 м).

Габаритная ширина судна может быть принята в пределах 16,0-17,2 м (в зависимости от наличия дополнительных подруливающих устройств).



*Рис. Схема арки шлюза Каховской ГЭС*

*Источник: [АСК «Укрречфлот»]*

Надводный габарит судна может быть равным или меньше 16,7 м (для работы по Днепру не выше Запорожья). Для работы выше Запорожья до Кременчуга – 14,5 м. Для работы выше Кременчуга – 12,8 м. Для работы на второй грузовой район порта Ростов-на-Дону – ковш Александровский, наибольший надводный габарит будет равен 14,0 м.

Рабочий теоретический диапазон осадок судна «Днепро-Макс» класса изменяется в пределах 3,00-4,50 м. Учитывая незначительный экспортно-импортный грузопоток по Днепру выше Днепропетровска, а точнее его практически полное отсутствие [9], можно говорить о рабочем диапазоне осадок 3,60-4,50 м.

Таким образом, после того, как путевые условия определили главные размерения судна, следующим шагом является определение на основе указанной в техническом задании скорости хода  $V_s$  оптимального значения коэффициента общей полноты  $C_b$ .

Максимально возможный дедвейт судна обеспечивается рациональным конструированием связей корпуса, ведущим к минимизации веса металлического корпуса.

Предлагаемая схема может быть использована при проектировании любого транспортного судна внутреннего, смешанного река-море и ограниченного морского плавания, ориентированного для работы на порты Днепра.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РСФСР. Т. 8. Волго-Донской водный путь. – Минречфлот РСФСР. – 1990. – 86 с.
2. Ваганов Г.И. Эксплуатация секционных составов. – М.: Транспорт, 1974. – 192 с.
3. Вицинский В.В., Страхов А.П. Основы проектирования судов внутреннего плавания. – Л.: Судостроение, 1970. – 454 с.
4. Все о портах Украины: Справочник // Порты Украины. – Одесса, 2005. – 657 с.
5. ГОСТ 26775-97. Габариты подмостовые судоходных пролетов мостов на внутренних водных путях. Введен в действие постановлением Госстроя России № 18-25 от 03.07.97. – 11 с.
6. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
7. Егоров Г.В. Выбор главных элементов сухогрузных и нефтеналивных судов смешанного «река-море» плавания // Судостроение. – 2004. – № 6. – С. 10-16.

8. Егоров Г.В. «Линейка» многоцелевых сухогрузных судов Морского инженерного бюро // Морская Биржа. – 2005. – № 4 (14). – С. 16-20.
9. Предпосылки создания и концепты нового поколения сухогрузных судов смешанного река-море плавания для Украины / Г.В. Егоров, С.Н. Баскаков, А.Г. Егоров, И.Н. Бойко, В.А. Нильва // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2012. – Вип. 35. – С. 12-44.
10. Лесюков В.А. Теория и устройство судов внутреннего плавания. – М.: Транспорт, 1982. – 303 с.
11. Михайлов А.В. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Ч. I. Внутренние водные пути. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 448 с.
12. Морские каналы и средства навигационного оборудования морских путей / В.М. Власов, Н.А. Ирхин, Г.В. Зеньковский и др. – М.: Транспорт, 2001. – 368 с.
13. Навігаційна річкова карта Нижнього Дніпра від Каховської ГЕС до гирла. № 3528. ДУ «Держгідрографія» / ФДУ «Укрморкартографія». – К.: Літера, 2008.
14. Навігаційна річкова карта Каховського водосховища від Дніпровської ГЕС до Каховської ГЕС, № 3529. ДУ «Держгідрографія» / ФДУ «Укрморкартографія». – К.: Літера, 2010.
15. Навігаційна річкова карта Дніпровського водосховища та річки Самара від міста Новомосковськ до гирла. № 3530. ДУ «Держгідрографія» / ФДУ «Укрморкартографія». – К.: Літера, 2009.
16. Навігаційна річкова карта Дніпродзержинського водосховища та гирлової частини річки Ворскла. № 3531. ДУ «Держгідрографія» / ФДУ «Укрморкартографія». – К.: Літера, 2011.
17. Навігаційна річкова карта Кременчуцького водосховища від Канівської ГЕС до Кременчуцької ГЕС. № 3532. ДУ «Держгідрографія» / ФДУ «Укрморкартографія». – К.: Літера, 2011.
18. Навігаційна річкова карта Канівського водосховища від Київської ГЕС до Канівської ГЕС. № 3533. ДУ «Держгідрографія» / ФДУ «Укрморкартографія». – К.: Літера, 2007.
19. Навігаційна річкова карта Київського водосховища, річки Дніпро від Лоева до Камарина, річки При'ять від Усівського плеса до Чорнобиля. № 3534. ДУ «Держгідрографія» / ФДУ «Укрморкартографія». – К.: Літера, 2012.
20. Понятовский В.В. Морские порты и транспорт: (эволюция). – М.: Московская Академия водного транспорта, 2006. – 429 с.

21. Правила плавания по внутренним водным путям Российской Федерации. Утверждены Приказом Минтранса № 129 от 14.10.02. Зарегистрированы в Минюсте РФ 30.12.02 (регистрационный № 4088). – М.: РКонсульт, 2004. – 33 с.
22. Правила судноплавства на внутрішніх водних шляхах України. Затверджені Наказом Міністерства транспорту України № 91 від 16.02.04. Зареєстровані в Міністерстві юстиції України 12.07.04 (реєстраційний № 872/9471). URL: – <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0872-04> (дата обращения 25.02.2013).
23. Природа Украинской ССР. Моря и внутренние воды /В.Н. Грезе, Г.Г. Поликарпов, В.Д. Романенко и др. – К.: Наукова думка, 1987.
24. Про затвердження Правил пропуску суден через судноплавні шлюзи України. Затверджено Наказом Міністерства транспорту України № 809 від 20.10.03. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 04.11.03 (реєстраційний № 1010/8331). URL: – <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z1010-03> (дата обращения 04.03.2013).
25. Проектирование судов внутреннего плавания / Н.К. Дормидонтов, В.Н. Анфимов, П.А. Малый и др. – Л.: Судостроение, 1974. – 335 с.
26. Речные порты Европейской части России. – СПб.: Информационно-аналитическое агентство SeaNews, 2006. – 43 с.
27. Сайт Измашьского морского торгового порта. URL: – <http://www.izmport.com.ua/> (дата обращения 19.06.2013).
28. Сайт SIF Service. URL: – <http://www.sifservice.com/> (дата обращения 19.06.2013).
29. Сайт ЕСИМ. URL: – <http://www.russianports.ru/> (дата обращения 19.06.2013).
30. Снопков В.И. Управление судном. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 536 с.
31. Справочник эксплуатационника речного транспорта / М.Д. Амусин, В.С. Бубякин, К.А. Гаринев и др./ Под ред. С.М. Пьяных. – М.: Транспорт, 1995. – 360 с.
32. Black Sea and Sea of Azov pilot. – United Kingdom Hydrographic Office, 2003. – 292 с.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2013

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співпрацівник Морського інженерного бюро, науковий консультант **В.В. Козляков**

УДК 629.123.1.001

Т.В. Тарасенко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ СУДНА ПРИ ДВИЖЕНИИ  
НА ВОЛНЕНИИ С УЧЕТОМ КУРСОВОГО УГЛА**

*Предложен подход к определению сопротивления движения судна в зависимости от курсового угла встречи волн и оценке экономичности рейса по критерию удельного эффективного расхода топлива.*

**Ключевые слова:** сопротивление воды движению судна, движение судна на волнении, учет курсового угла, оценка экономичности рейса, критерий удельного эффективного расхода топлива.

*Запропоновано підхід до визначення опору руху судна в залежності від курсового кута зустрічі хвиль та оцінки економічності рейсу за критерієм питомої ефективної витрати палива.*

**Ключові слова:** сила спротиву рідин руху судна, рух судна в умовах хвилювання, урахування впливу курсового кута щодо хвилювання, оцінка економічності рейсу, критерій питомої ефективної витрати палива.

*An approach to assess the ship's resistance in performance of voyage's economics by means of specific fuel consumption.*

**Keywords:** ship resistance, ship moving in rough sea condition, estimation of economy of voyage, criterion of specific effective fuel consumption.

Расчет сопротивления движению и определение потребной мощности и расхода топлива главных двигателей является одной из важнейших задач как при проектировании судна, так и при определении оптимальных режимов эксплуатации пропульсивного комплекса судна в период его эксплуатации. Как правило, это связано с определенной практической необходимостью поиска методов, которые бы позволили с достаточной степенью надежности уточнить известные расчетные схемы определения сопротивления для конкретного класса судов или для конкретного судна. Рассмотрим отдельные методы расчета, получившие наиболее широкое распространение.

При проектировании в основном применяется метод Холтропа-Меннена, однако погрешность значений полного сопротивления по этому методу достаточно велика, что значительно сужает диапазон его применимости даже для ранних стадий проектирования судна. Для судна, находящегося в эксплуатации, этот метод не применим вовсе.

Методы расчета полного сопротивления с применением способа В.М. Штумпфа для расчета коэффициента остаточного сопротивления и по ОСТ 5.0181-75 «Атлас диаграмм для расчета буксировочной мощности транспортных судов», а также способ Ю.А.Будницкого применимы для

крупных морских судов. Погрешность расчета по каждому из этих способов может быть определена применительно к каждому конкретному судну путем сопоставления результатов с данными эксплуатационных наблюдений.

На рис. 1 приведены кривые полного сопротивления на тихой воде, построенные для т/х «Измаил» ( $L = 82,3$  м;  $B = 15,5$  м;  $d = 5,67$  м;  $V = 5601,36$  м<sup>3</sup>;  $\delta = 0,771$ ) по результатам расчетов различными способами (кривые 1, 2, 3) и по результатам эксплуатационных наблюдений (кривая 4), проведенных в различных эксплуатационных условиях, [6, 7]. Соответственно, сравнение кривых подтверждает полную неприменимость для данного типа судов способа Холтропа-Меннена. Способы В.М. Штумпфа, ОСТ 5.0181-75 «Атлас диаграмм для расчета буксировочной мощности транспортных судов», а также способ Ю.А. Будницкого применимы при условии корректной адаптации применяемых вспомогательных диаграмм, что не всегда возможно ввиду отсутствия достоверных однотипных данных.

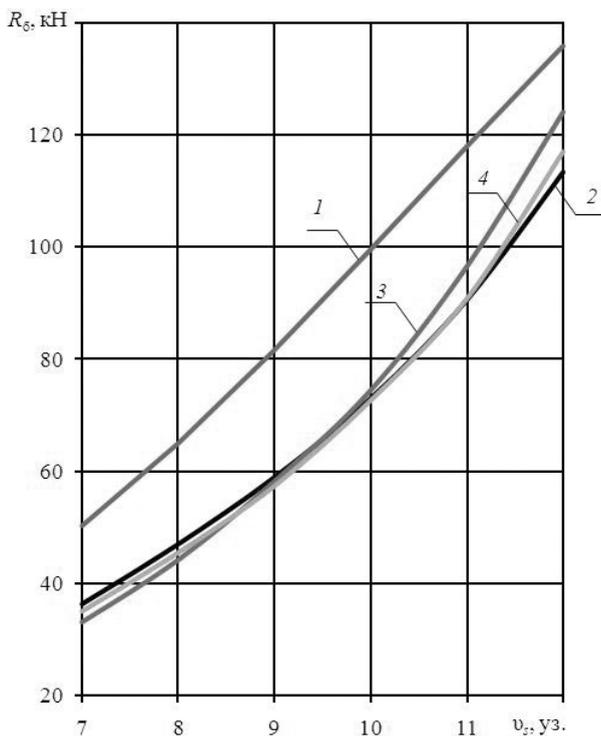


Рис. 1. Кривые полного сопротивления  $R_c$  для т/х «Измаил», рассчитанного различными способами: 1 – способом Холтропа-Меннена; 2 – по ОСТ 5.0181-75 «Атлас диаграмм для расчета буксировочной мощности транспортных судов»; 3 – способом Ю.А. Будницкого; 4 – пересчетом данных, полученных в эксплуатационных наблюдениях

Данные для построения кривой 4 на рис. 1 взяты из эксперимента, во время которого заполнялись протоколы наблюдений по группам данных – погодные условия (сила и направление ветра, интенсивность волнения, курсовой угол встречи волн); данные по судну (состояние загрузки, посадка, характеристики начальной остойчивости, скорость движения), данные по режиму работы пропульсивного комплекса – нагрузка на главный двигатель (в % от максимальной мощности  $N_{\max}$ ), разворот лопасти ВРШ (по положению рукоятки управления), частота вращения гребного винта, расход топлива. Значение сопротивления движению судна определяется из соотношения

$$R = \frac{kN_e}{v},$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние корпуса, попутный поток, засасывание, путевые потери мощности.

Для т/х «Измаил» формула коэффициента принимала вид:

$$k = 0,143 \cdot v_s^{0,381} \text{ – при включенном валогенераторе;}$$

$$k = 0,111 \cdot v_s^{0,473} \text{ – при выключенном валогенераторе.}$$

Соответственно, графики эмпирического коэффициента  $k$  при различных скоростях для т/х «Измаил» приведены на рис.2, а его численные значения – в табл. 1.

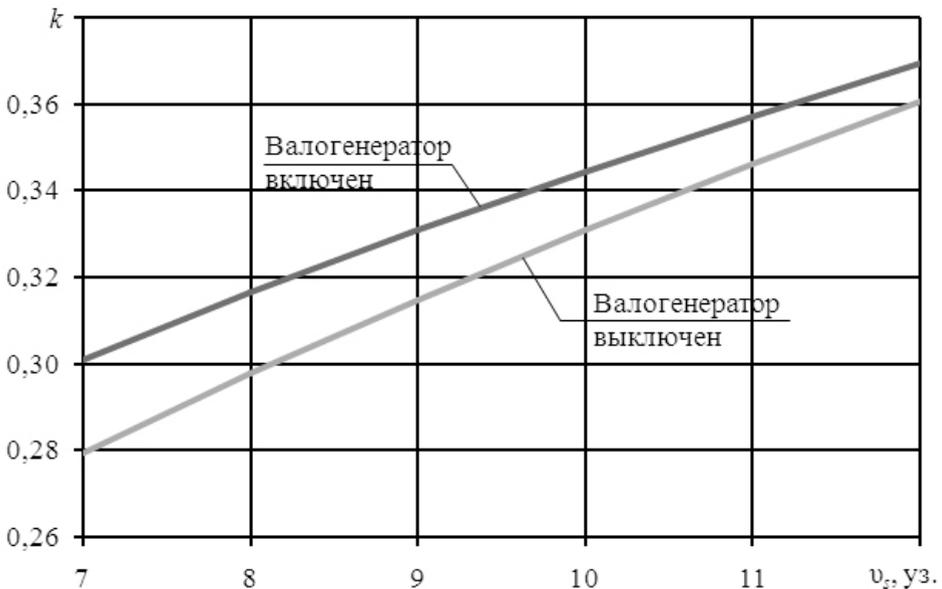


Рис. 2. Графики эмпирического коэффициента  $k$  в зависимости от скорости для т/х «Измаил»

Таблиця 1

Значения коэффициента  $k$  для т/х «Измаил»

Скорость движения судна $v_s$ , уз.	$k$	
	При работающем валогенераторе	При отключенном валогенераторе
7	0,30	0,28
8	0,32	0,30
9	0,33	0,31
10	0,34	0,33
11	0,36	0,35
12	0,37	0,36

Как правило, суда совершают рейсы в условиях ветра и нерегулярного морского волнения различной интенсивности и очень часто имеют ограничения по району и условия плавания в штормовых условиях. Однако даже если ограничения не установлены классификационным обществом, капитан судна на свое усмотрение никогда не принимает решение выходить в рейс в условия жестокого шторма. Если же плохие погодные условия наступают во время рейса судна, капитан, принимая решения о следовании курсом через зону штормования или об изменении курса с целью обойти зону наиболее сильного шторма, должен располагать конкретными данными по поведению судна на волнении с учетом различных курсовых углов встречи волн. Это особенно важно для судов, работающих на «Коротких морских линиях» (Short Sea Shipping), где свобода в принятии решения значительно ограничена.

В качестве базы для создания подобных рекомендаций целесообразно использовать данные о значениях сопротивления движению судна с учетом силы ветра, интенсивности волнения и курсового угла встречи волн. Наиболее часто встречающиеся эксплуатационные условия плавания для судов, совершающих рейсы на коротких морских линиях, как правила находятся в диапазоне от полного штиля до 4-5 балльного волнения. Если взять шаг по высоте волны 3 %-й обеспеченности  $\Delta h_{3\%} = 0,25$  м, а по скорости ветра  $\Delta v_{\text{вТ}} = 1$  м/с, то в эксплуатационном диапазоне можно выделить 9 промежуточных условий плавания, которые могут быть приняты в качестве расчетных:

- 1 – полный штиль;
- 2 – волнение моря 1 балл,  $h_{3\%} = 0,25$  м, ветер 3 балла,  $v_{\text{вТ}} = 5$  м/с;
- 3 – волнение моря 2 балла,  $h_{3\%} = 0,5$  м, ветер 4 балла,  $v_{\text{вТ}} = 6$  м/с;
- 4 – волнение моря 3 балла,  $h_{3\%} = 0,75$  м, ветер 4 балла,  $v_{\text{вТ}} = 7$  м/с;
- 5 – волнение моря 3 балла,  $h_{3\%} = 1,0$  м, ветер 5 баллов,  $v_{\text{вТ}} = 8$  м/с;
- 6 – волнение моря 3-4 балла,  $h_{3\%} = 1,25$  м, ветер 5 баллов,  $v_{\text{вТ}} = 9$  м/с;
- 7 – волнение моря 4 балла,  $h_{3\%} = 1,5$  м, ветер 5 баллов,  $v_{\text{вТ}} = 10$  м/с;
- 8 – волнение моря 4 балла,  $h_{3\%} = 1,75$  м, ветер 6 баллов,  $v_{\text{вТ}} = 11$  м/с;
- 9 – волнение моря 4 балла,  $h_{3\%} = 2,0$  м, ветер 6 баллов,  $v_{\text{вТ}} = 12$  м/с.

Соответственно, кривые полного сопротивления движению судна на нерегулярном морском волнении  $\tilde{R}$  могут быть построены для соответствующих курсовых углов (рис. 3). На рис. 3 кривые пронумерованы в соответствии с порядковым номером перечисленных условий плавания.

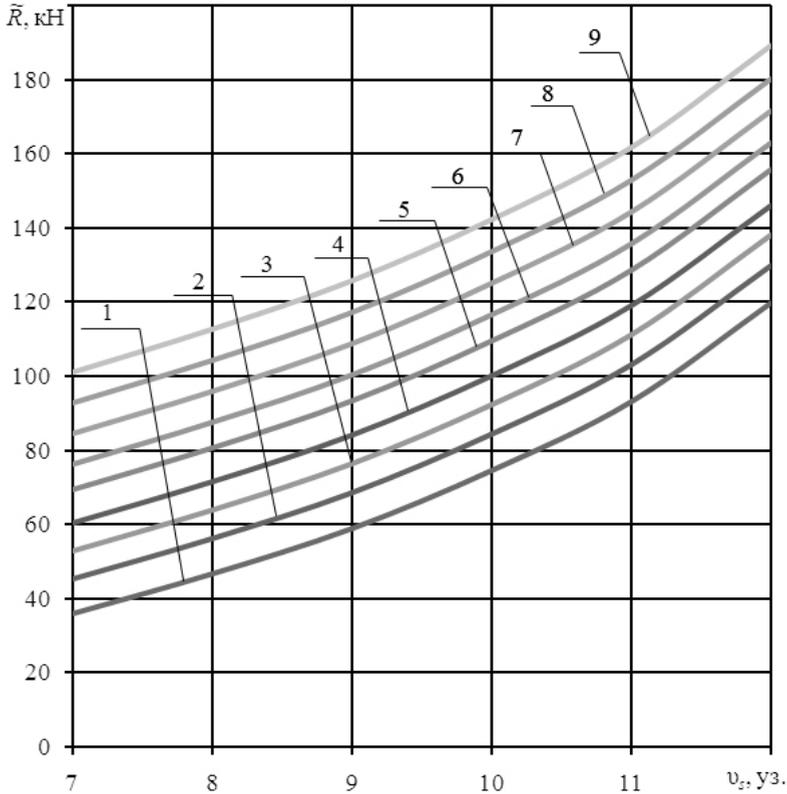


Рис. 3. Кривые среднего по времени полного сопротивления на нерегулярном волнении  $\tilde{R}$  для т/х «Измаил» при курсовом угле встречи волн  $\varphi_{\text{в}} = 40^\circ$  в зависимости от скорости для условий плавания 1-9

Среднее по времени сопротивление судна на нерегулярном морском волнении оценивается по известному выражению

$$\tilde{R} = R_0 + \tilde{R}_{\text{вт}} + \Delta\tilde{R}_{\text{вд}}.$$

Аэродинамическое сопротивление судна под действием ветра – среднее ветровое сопротивление в условиях нерегулярного ветро-волнового режима [4].

$$\tilde{R}_{\text{вт}} = C_{\text{вт}} \frac{\rho_{\text{вт}}}{2} F_{\text{п}} (v_0^2 + v_{\text{вт}}^2 + v_0 v_{\text{вт}} \cos \varphi_{\text{в}}),$$

где  $C_{вт}$  – коэффициент воздушного сопротивления судна,

$$C_{вт} = C_0 \bar{C}_{вт}(\varphi_v);$$

$C_0$  – коэффициент сопротивления при встречном ветре, принимающий значение 0,8-1,3 для танкеров, 0,7-1,2 – для грузовых и пассажирских судов, 0,7-1,0 – для лайнеров и 0,4-0,6 – для быстроходных судов (верхние значения относятся к судам, имеющим конструкции, приводящие к срывам потока (надстройки разделены, имеют плохобтекаемую форму, навесы));

$\bar{C}_{вт}(\varphi_v)$  – составляющая, зависящая от угла  $\varphi_v$ ;

$\rho_{вт}$  – массовая плотность воздуха;  $F_{п}$  – площадь поперечной проекции надводной части судна;

$v_{вт}$  – скорость ветра;

$\varphi_v$  – угол между направлением ветра и направлением движения судна (считается, что генеральные направления ветра и волн совпадают).

Дополнительное волновое сопротивление [5]

$$\Delta \tilde{R}_{вл} = (1-w) \left( \frac{L}{100} \right)^3 C_{вл},$$

где  $w$  – коэффициент засасывания;

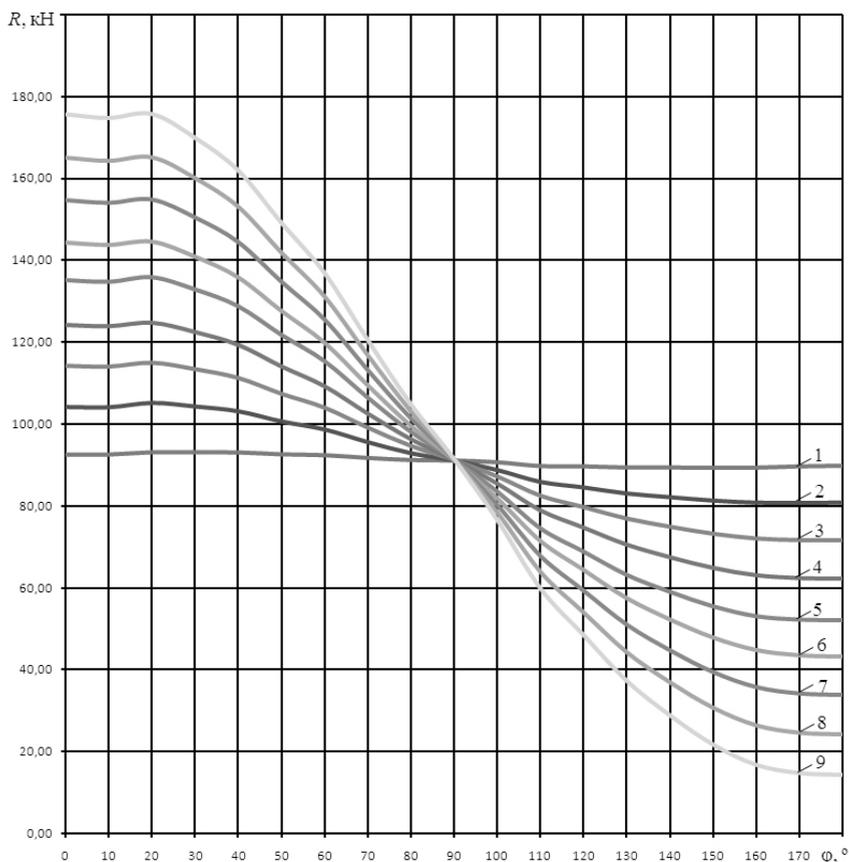
$$C_{вл} = A_0 + A_1 \cdot 100(\delta - 0,5)^5 + A_2 \frac{L}{B} + A_3 \frac{L}{10T_{\otimes}} + A_4 \frac{x_c^0}{10L} + A_5 \cdot 10 \frac{r_{\psi}}{L} +$$

$$+ K \left( A_6 + A_7 \frac{L}{10T_{\otimes}} \right) + A_8 \cdot 10Fr$$

Коэффициенты среднего дополнительного сопротивления судна на встречном нерегулярном морском волнении  $A_0$ - $A_8$  зависят от типа, длины судна и силы волнения, определяются по графикам, приведенным в [5], в зависимости от курсового угла встречи волн.

Характер кривых коэффициентов  $A_0$  –  $A_8$  определяет форму кривой сопротивления в зависимости от курсового угла встречи волн (рис. 4).

Несомненно важным при этом является уточнение показателя экономичности принимаемого решения по выбору курсового угла. В данном случае в качестве такого показателя выбран удельный эффективный расход топлива  $b_e$ , кг/кВт·ч. Система управления главным двигателем и ВРШ таких судов (с валогенератором при постоянной частоте вращения двигателя) обычно имеет специальный регулятор нагрузки, управляющий шагом ВРШ при волнении [8], рис. 5.



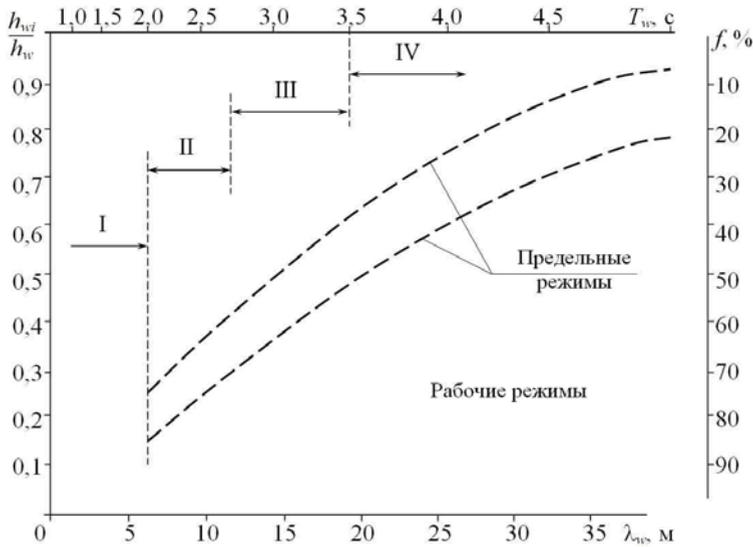
*Рис. 4. Кривые среднего по времени полного сопротивления на нерегулярном волнении  $\tilde{R} = f(\varphi_{в})$  для т/х «Измаил» при скорости судна  $v = 11$  уз. в зависимости от курсового угла встречи волн в условиях плавания 1-9*

Специфика действия этой системы состоит в изменении шага ВРШ, поддерживая соответствие цикловой подачи топлива заданной частоте вращения гребного вала. Значение цикловой подачи, а значит и часового расхода топлива при воздействии условно регулярного волнения определяется по формуле

$$B_{ч} = F \cdot B_{чн} \left( \frac{n}{n_n} \right),$$

где  $F$  – относительная координата топливоподачи в цилиндры двигателя (в %), соответствующая цикловой подаче;

$B_{чн}$  – расход топлива на двигатель при номинальных значениях мощности  $N_{ен}$  и частоты  $n_n$ .



*Рис. 5. Зоны режимов управления судном при волнении:  
I – зона устойчивого управления; II – зона перехода к штормованию;  
III – зона штормования (РН выключен);  
IV – зона режимов, требующих обхода зоны штормования;  
 $f, \%$  – повторяемость;  $\lambda_w, T_w$  – длина волны и ее период;  
 $h_{wi}$  – кажущаяся высота волны;  $h_w$  – высота волны в спектре волнения*

При работе регулятора нагрузки и регулятора частоты вращения для системы с валогенератором обеспечивается  $n \approx n_n = \text{const}$ . Соответственно

$$b_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_e} = F \frac{B_{\text{чн}}}{N_e}.$$

В режиме условно регулярного волнения моменты сопротивления  $M_p$  и эффективный двигателя  $M_e$

$$\frac{\widetilde{M}_p}{M_{\text{рн}}} = \left( \frac{\widetilde{v}}{v_n} \right)^\alpha; \quad \frac{\widetilde{M}_e}{M_{\text{ен}}} = \left( \frac{\widetilde{v}}{v_n} \right)^\alpha.$$

Так как при  $n = \text{const}$   $\overline{N}_e = \overline{M}_e = F$ , то можно принять

$$F = \left( \frac{\widetilde{v}}{v_n} \right)^\alpha.$$

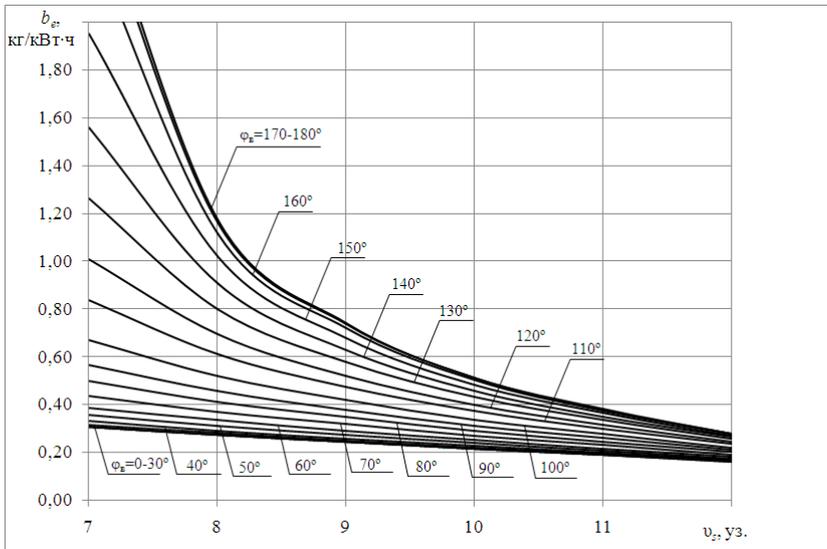


Рис. 6. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $b_e$  от скорости судна  $v$  для различных значений курсового угла встречи волн  $\varphi_w$  (волнение моря 3 балла,  $h_{3\%} = 0,75$  м, ветер 4 балла,  $v_{ем} = 7$  м/с).

**Заключення.** Наличие подобных рис. 6 кривых для волнения и ветра различной интенсивности открывает возможность как оперативной, так и предварительной (с учетом сезонных особенностей региона плавания и отдельных зон движения судна в рейсе) оценки экономичности рейса. При этом, соответственно, должны абсолютно быть обеспечены требования по безопасности (недопущения опасного слеминга, брочинга, захвата судна волной, резонанса бортовой качки, параметрического резонанса).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Прогнозирование влияния нерегулярного волнения на ходкость одновинтового судна // Автоматизация судовых технических средств: Научн.-техн. сб. – 2005. – Вып. 10. – Одесса: ОНМА. – С. 76-92.
2. Handbuch Nautik II. Technische und betriebliche Schiffsführung. Hamburg: Seehafen Verlag, 2011. – 776 S.
3. Справочник по теории корабля: В 3-х т. / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – Т.1: Гидромеханика, сопротивление движению судов, судовые двигатели. – 764 с. – Т.2: Статика судов, качка судов. – 440 с. – Т.3: Управляемость водоизмещающих судов, гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. – 540 с.

4. *Липиц В.Б. Гидродинамика гребного винта при качке судна. – Л.: Судостроение, 1975. – 264 с.*
5. *Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Задача создания Short Sea Shipping – коротких морских сообщений для Дуная // International Black Sea Transport Forum. Транспортная стратегия Украины. 21–22 октября 2009 г. Официальный каталог – 2009. – Одесса: Mediasotpass. – С. 40-41.*
6. *Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Домбровский В.А. Оценка расхода топлива в судовых условиях // Автоматизация судовых технических средств: Научн.-техн. сб. – 2006. – Вып. 11. – Одесса: ОНМА. – С. 78-87.*
7. *Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Оценка расхода топлива и потери скорости в условиях штормового волнения // Автоматизация судовых технических средств: Научн.-техн. сб. – 2007. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – С. 115-121.*
8. *Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Определение рационального шага ВРШ в условиях доштормового волнения на коротких морских линиях // Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С. 111-123.*

*Стаття надійшла до редакції 20.09.2013*

**Рецензенти:**

кандидат технічних наук доцент кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету **Ю.М. Ларкін**

кандидат технічних наук доцент кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету **А.В. Демідюк**

УДК 69.05:658.562:728.1

В.А. Гришин

МОРСКИЕ ИСКУССТВЕННЫЕ ОСТРОВА.  
ЧАСТЬ 3

*Приведены некоторые методы расчета берегозащитных сооружений на морских островах.*

**Ключевые слова:** море, берегозащитные сооружения, методы расчета.

*Приведені деякі методи розрахунку берегозахисних споруд на морських островах.*

**Ключові слова:** море, берегозахисні споруди, методи розрахунку.

*Some methods of calculation coast-protecting constructions on sea islands are resulted.*

**Keywords:** the sea, coast-protecting structure, calculation methods



Данная статья является продолжением ранее опубликованных работ [1, 2]. В ней будут рассмотрены вопросы берегоукрепления морских островов. Если недалеко друг от друга создается система морских островов, то обычно, как например, в Дубаи и в России [1], для их берегозащиты сооружаются волноломы, окружающие эти острова.

При возведении одного морского острова очень часто производится его индивидуальная берегозащита, сооружаемая непосредственно на этом острове. Тип берегоукрепления во многом зависит от его назначения. Так, например, если на острове требуется создание обширных пляжей, то сооружение его берегозащиты в виде наброски камня или искусственных массивов, как показано на рисунке 1, не рекомендуется.



*Рис. 1. Берегозащита бетонными массивами*

Ошибочное проектирование берегозащитных сооружений или нарушение технологии их строительства может привести от динамического воздействия штормовых волн к разрушению возведенных конструкций и размыву самих островов, как показано на рисунке 2. Из всего многообразия берегозащитных сооружений, приведенных, например, в [3, 4], в данной статье будут рассмотрены волноотбойные стенки гравитационного типа, одна из которых во время строительства показана на рисунке 3.

В большинстве случаев в прибойной зоне морские волны воздействуют на волноотбойные стенки в виде динамического импульса, как показано на рисунке 4. Но в нормативных документах [5, 6] такая нагрузка в расчетах приближенно заменяется эквивалентной статической нагрузкой. Такая замена не позволяет учесть некоторые важные реально наблюдаемые факторы, присущие только динамическим воздействиям. Некоторые из этих вопросов рассмотрены в монографии [7]. Наиболее полно динамическое действие морских волн на оградительные сооружения исследовано в работе [8]. В данной работе будет рассмотрено только динамическое воздействие волн на берегозащитные сооружения.



*Рис. 2. Разрушение берегозащитных сооружений от штормовых волн*



*Рис. 3. Сооружение волноотбойной стенки*



*Рис. 4. Действие прибойных волн на стенку*

Определение, исследование и методы решения динамических уравнений при малых и больших деформациях приведены в монографии [9]. При этом волноотбойная стенка, массив грунта и морская вода рассматриваются как единая расчетная система. Для материала стенки и грунтовой среды учитывались их упругопластические свойства. Для преобразования дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений применялся метод конечных элементов. В окончательном виде эти нелинейные уравнения в матричной форме имеют следующий вид:

$$\left(\mathbf{M} + \frac{1}{\rho}[\mathbf{h}]^T[\mathbf{H}]^{-1}\mathbf{h}\right)\ddot{\boldsymbol{\delta}}_n + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\delta}}_n + \mathbf{K}(\boldsymbol{\delta}_n)\boldsymbol{\delta}_n = \mathbf{Q}_n.$$

В это уравнение входят матрицы:

$\boldsymbol{\delta}_n$  – узловые перемещения;

$\dot{\boldsymbol{\delta}}_n$  – узловые скорости;

$\ddot{\boldsymbol{\delta}}_n$  – узловые ускорения;

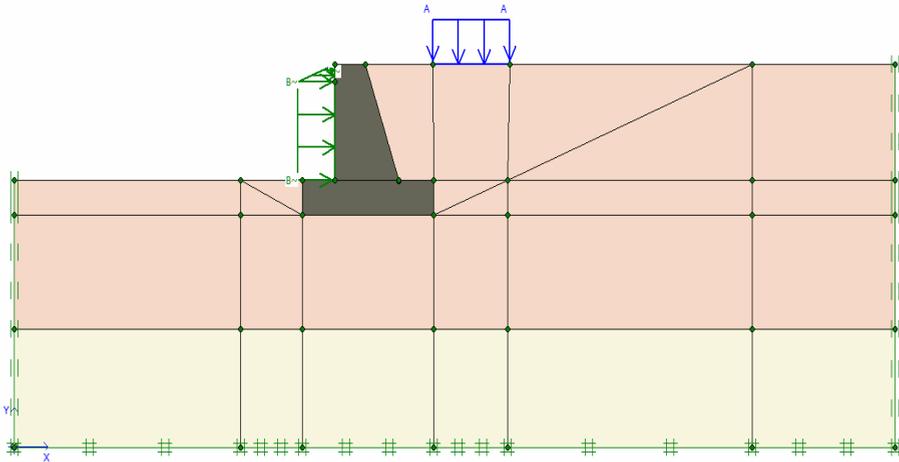
- M** – масса системы;
- C** – демпфирования системы;
- K** – жесткости системы;
- Q<sub>n</sub>** – поверхностные и объемные силы.

$\frac{1}{\rho}[\mathbf{h}]^T[\mathbf{H}]^{-1}\mathbf{h}$  называется матрицей присоединенных масс, учитывающей влияние водной среды на сооружение. Обозначим ее сумму с матрицей **M** через  $\overline{\mathbf{M}}$  и назовем приведенной массой. В этом случае указанное выше уравнение запишется как

$$\overline{\mathbf{M}}\ddot{\delta}_n + \mathbf{C}\dot{\delta}_n + \mathbf{K}(\delta_n)\delta_n = \mathbf{Q}_n.$$

Для решения полученных нелинейных уравнений использовался прямой пошаговый неявный метод в приращениях, не требующий предварительных их преобразований перед вычислениями на ЭВМ по разработанному программному комплексу [9]. Некоторые динамические задачи расчета портовых гидротехнических сооружений приведены в монографии [10].

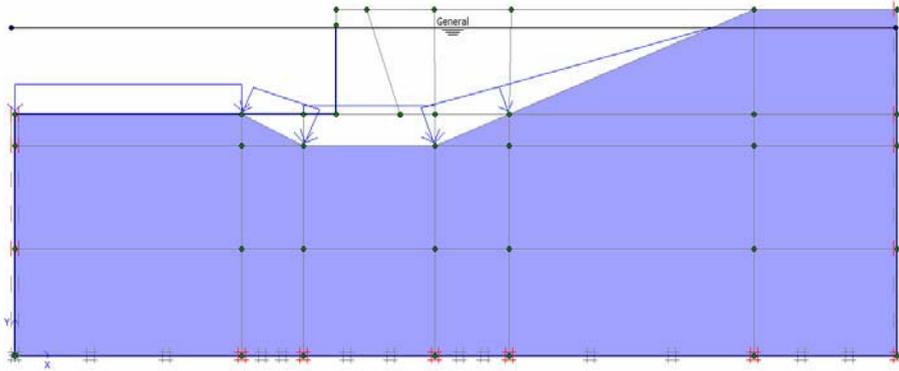
Методику расчета покажем на приведенном ниже примере. Его расчетная система показана на рисунке 5.



*Рис. 5. Расчетная схема системы*

Грунтовый массив состоит из двух слоев. Вертикальная распределенная нагрузка является статической. Горизонтальная нагрузка, приложенная к стенке, является динамической и определяет действие морских волн. Расчет выполняется поэтапно соответственно процессу технологии

строительства и эксплуатации берегозащитного сооружения. Это вызвано тем, что возникающее в системе напряженно-деформированное состояние существенно зависит от порядка ее нагружения. Рассмотрено шесть этапов расчета. На первом этапе выполняется расчет только грунтового массива перед началом строительства стенки от действия его собственного веса и морской воды. Расчетная схема этого этапа показана на рисунке 6.



*Рис. 6. Расчетная схема первого этапа расчета*

На втором этапе выполняется расчет системы от действия плиты под стенку и самой стенки. При этом полученные на первом этапе расчета напряжения в грунте сохраняются, а перемещения обнуляются, т.е. отсчет перемещений на дальнейших этапах производится от начала строительства плиты. Схема деформирования системы в увеличенном масштабе показана на рисунке 7. Наибольшее полное перемещение, расположенное под левым краем плиты, равно 2,53 см.

На третьем этапе выполняется расчет после засыпки грунта за стенкой. Эпюра полных перемещений системы приведена на рисунке 8. Наибольшее полное перемещение, равное 5 см, находится на верхней грани грунтового массива. Полные перемещения в любой точке системы можно определить по масштабной линейке, показанной в правой части рисунка 8.

На четвертом этапе выполняется расчет от действия вертикальной распределенной нагрузки. Эпюра касательных напряжений, возникающих в системе, показана на рисунке 9. Наибольшее касательное напряжение расположено в грунтовом массиве под левым краем плиты и равно  $-37,58 \text{ кН/м}^2$ .

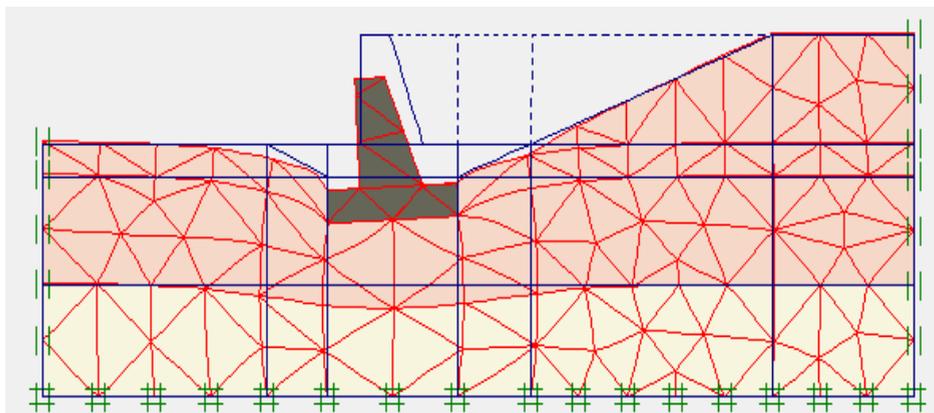


Рис. 7. Схема деформирования системы после второго этапа расчета

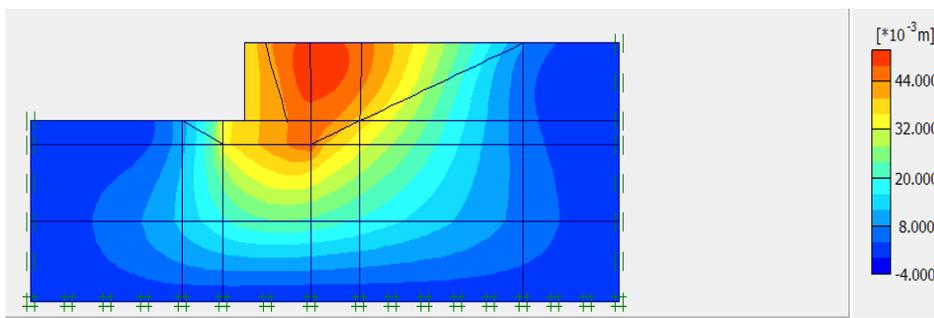


Рис. 8. Эюра полных перемещений системы после третьего этапа расчета

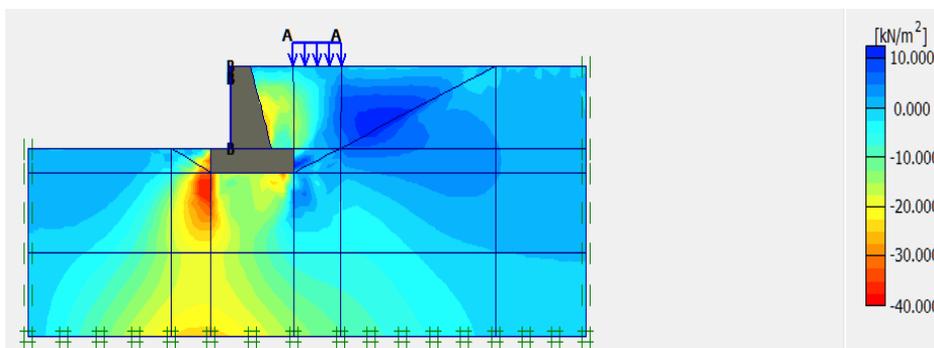
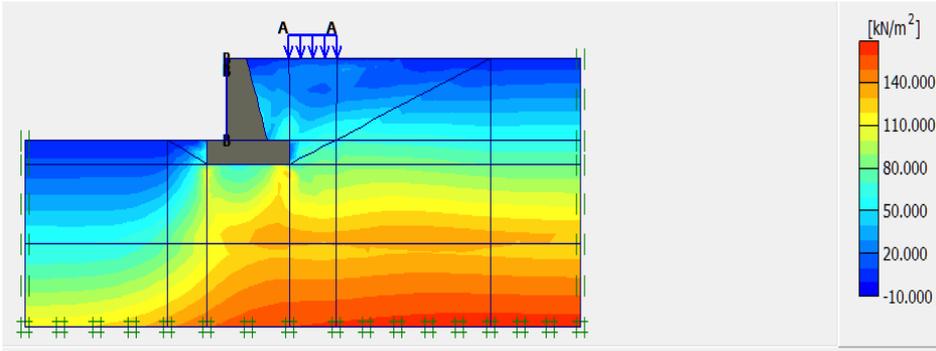
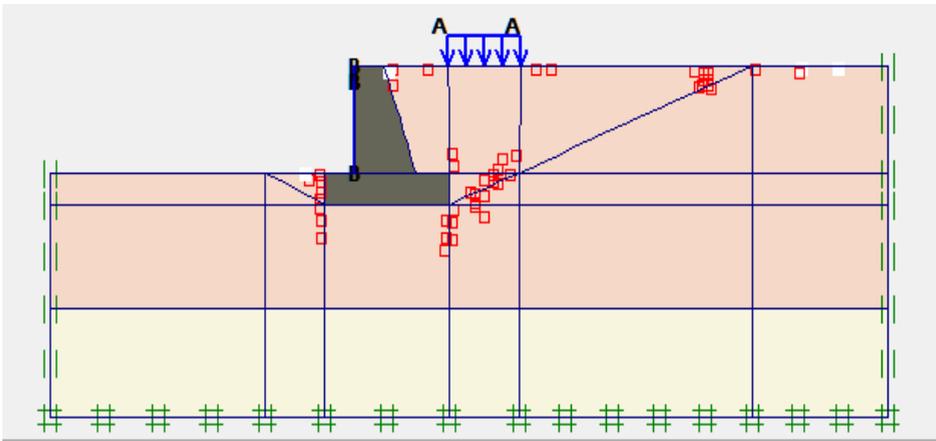


Рис. 9. Эюра касательных напряжений после четвертого этапа расчета

На пятом этапе выполняется расчет от действия динамической нагрузки морских волн. Время действия волны равно 0,01с. В дальнейшем рассмотрим результаты, полученные от действия только этой волны. Эпюра полных напряжений через 0,01с после начала приложения волновой нагрузки показана на рисунке 10. Схема образования пластических зон (квадратики) приведена на рисунке 11.



*Рис. 10. Эпюра полных напряжений после пятого этапа нагружения*



*Рис. 11. Схема образования пластических зон после пятого этапа нагружения*

На шестом этапе выполняется расчет после снятия нагрузки от действия морской волны. Система начнет колебаться. На рисунке 12 приведено в увеличенном масштабе одно из возможных положений системы в процессе ее колебания. На рисунке 13 в масштабе стрелками показана эпюра изменения ускорений системы в один из моментов ее колебания. Наибольшее ускорение равно  $2,76 \cdot 10^{-3} \text{ m/day}^2$ . В процессе решения принималось, что волны колебаний на границах грунтового массива не отражались, а полностью поглощались.

Обозначим верхнюю левую точку стенки через А. Ее колебания на шестом этапе расчета, после воздействия морской волны, изображены на графике рисунка 14, где по горизонтали отложено время в секундах, а по вертикали перемещения в метрах. Аналогичные графики можно получить для любых узловых точек системы. Программа также допускает построение графиков колебаний скоростей, ускорений и напряжений для любой узловой точки системы.

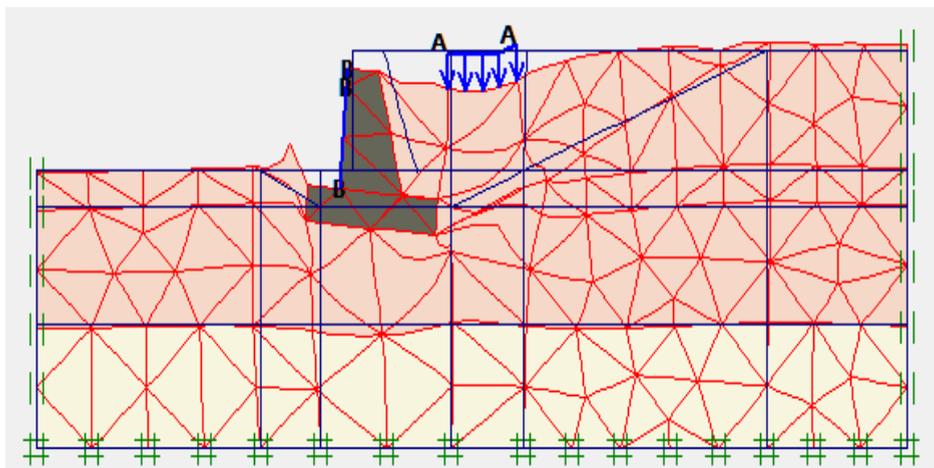


Рис. 12. Одно из положений системы в процессе ее колебаний

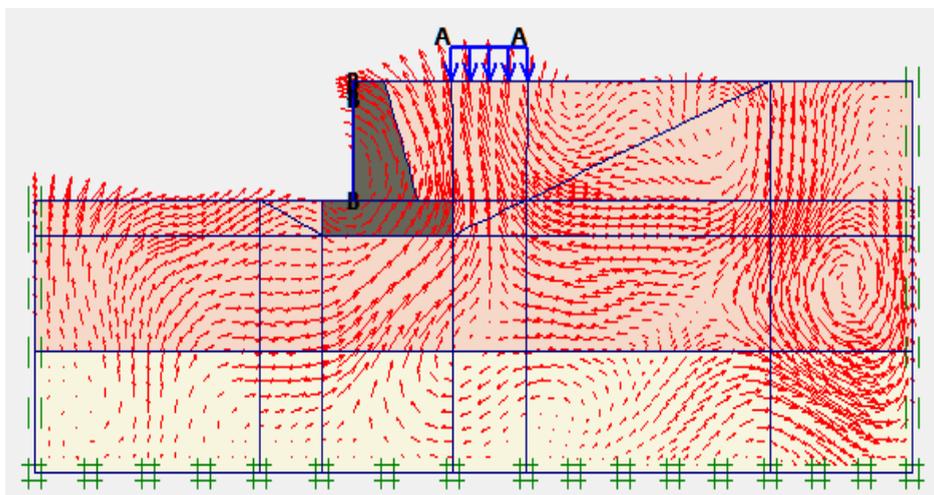


Рис. 13. Эюра изменения ускорений в системе

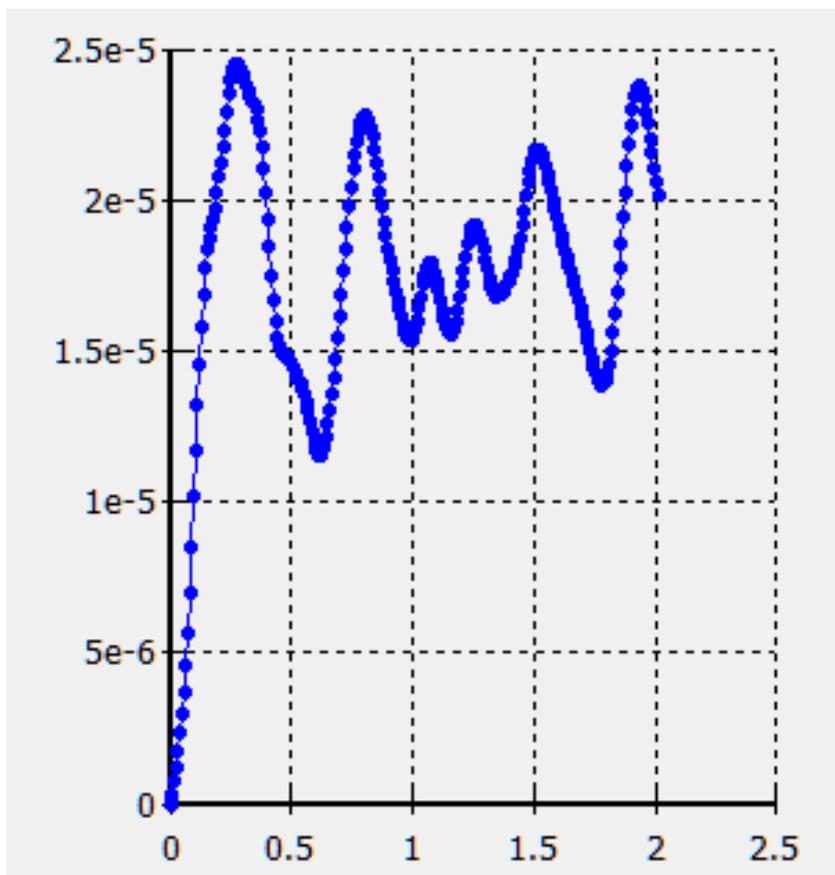


Рис. 14. Колебания точки А

В последующих статьях будут рассмотрены расчеты других типов берегозащитных сооружений применительно к искусственным морским островам.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гришин В.А. Морские искусственные острова. Ч. 1) // Вісник ОНМУ. – № 36. – 2012. – С. 54.
2. Гришин В.А. Морские искусственные острова. Ч. 2) // Вісник ОНМУ. – № (2)38. – 2012. – С. 41.
3. Гришин В.А., Снисаренко В.И. Нелинейные модели берегоукрепительных сооружений. – К.: МП Леся, 2007. – 272 с.
4. Смирнова Т.Г. и др. Берегозащитные сооружения. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2002. – 303 с.

5. *СниП 2.06.04-82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)*. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 40 с.
6. *Лапто Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К.* – Л.: Научно-исследовательский институт гидротехники им. В.Е. Веденеева, 1990. – 432 с.
7. *Бигелоу Г., Эдмондсон В.* *Морские ветровые волны и прибой*. – М.: Изд. Иностранной литературы, 1951. – 212 с.
8. *Гришин А.В., Федорова Е.Ю.* *Нелинейная динамика ограждающих сооружений*. – Одесса: Изд-во ОНМУ, 2002. – 239 с.
9. *Гришин В.А., Дорофеев В.С.* *Нелинейные модели конструкций, взаимодействующих с грунтовой средой*. – Одесса: Внешне-рекламсервис, 2006. – 242 с.
10. *Гришин В.А. и др.* *Расчет гидротехнических сооружений в системе PLAXIS*. – К.: Издательский центр Азбука, 2011. – 240 с.

*Стаття надійшла до редакції 12.11.2013*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, генеральний директор  
Морського інженерного бюро **Г.В. Єгоров**

доктор технічних наук, професор, науковий консультант  
Морського інженерного бюро **В.В. Козляков**

УДК 620:178.3

А.В. Коноплёв

**ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА МОДЕЛИ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ  
НА СУММУ НАКОПЛЕННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ  
ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ**

*Сделан анализ влияния модели кривой усталости на сумму накопленных повреждений, найденных с помощью линейной гипотезы суммирования повреждений. Показано, что при использовании модернизированной уравнения Вейбулла в качестве модели кривой усталости можно добиться как повышения коэффициента корреляции, так и существенно уточнить сумму накопленных повреждений.*

**Ключевые слова:** сопротивление усталости, коэффициент корреляции, линейная гипотеза накопления повреждений.

*Зроблено аналіз впливу моделі кривої втоми на суму накопчених пошкоджень, які знайдені за допомогою лінійної гіпотези сумування пошкоджень. Показано, що при використанні модернізованого рівняння Вейбулла в якості моделі кривої втоми можна добитися як підвищення коефіцієнта кореляції, так й суттєво уточнити суму накопчених пошкоджень.*

**Ключові слова:** опір втоми, коефіцієнт кореляції, лінійна гіпотеза накопчення пошкоджень.

*The impact analysis of an endurance curve model on the sum of accumulated damages, found with the help of the liner hypothesis of damage summation, was done. It can be achieved both the increase of correlation coefficient and essentially make more exact the sum of the accumulated damages, using the modernized Weibull equation as an endurance curve.*

**Keywords:** endurance resistance, correlation coefficient, liner hypothesis of damage summation.

**Постановка проблемы.** При решении задач, связанных с нерегулярным режимом нагружения чаще всего используют линейную гипотезу накопления повреждений

$$a = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где  $a$  – сумма накопленных повреждений;

$n_i$  – число циклов на  $i$ -ом уровне циклических напряжений;

$N_i$  – долговечность до разрушения на  $i$ -ом уровне по кривой усталости;

$k$  – число уровней напряжений.

Формула (1) выражает теоретическую суть гипотезы, однако, если говорить о практическом смысле, то её следует писать в наиболее общем виде [1]

$$a = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \geq 1. \quad (2)$$

Такая запись обусловлена тем, что цикловое отношение, как правило, превышает единицу, причём с существенным смещением в большую сторону  $4,0 \geq a \geq 0,25$  [1].

В случае не дискретного, а непрерывного изменения нагрузки зависимости (1) и (2) запишутся соответственно в виде

$$a = \int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = \left( \int_{\sigma_1}^{\sigma_p} \frac{d\sigma}{N} \right) / \alpha = 1; \quad (3)$$

$$a = \int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = \left( \int_{\sigma_1}^{\sigma_p} \frac{d\sigma}{N} \right) / \alpha \geq 1. \quad (4)$$

Значения сумм накопленных повреждений, превышающих единицу, свойственны случаям, когда нагрузка имеет тенденцию к повышению. В случае понижения нагрузки эта величина, как правило, становится меньше единицы. При стохастическом режиме нагружения значение  $a$  близко к единице и изменяется в сравнительно узком диапазоне значений от 0,6 до 1,6 [1]. Принято считать, что именно режим нагружения в большей степени, чем другие факторы, влияет на величину суммы накопленных повреждений. К числу этих факторов можно отнести размеры испытуемых объектов, материал, наличие концентраторов напряжений, покрытий, упрочнения и т. д.

Несмотря на многочисленные экспериментальные исследования, направленные на проверку линейной гипотезы суммирования повреждений в настоящее время нет однозначной оценки того, как перечисленные факторы оказывают влияние на величину  $a$ . Попытки заменить линейную гипотезу другими теориями накопления повреждений привели к усложнению расчётов. В разное время были предложены нелинейные гипотезы [1], в которых для уточнения величины  $a$ , было необходимо опре-

делять ряд параметров или коэффициентов, проведя соответствующие дополнительные испытания. В связи с этим в настоящее время большинство расчётов проводят на основе линейной гипотезы суммирования повреждений, резервы точности которой не исчерпаны. Таким дополнительным резервом может быть выбор модели кривой усталости.

**Цель настоящего исследования** – уточнение суммы накопленных повреждений и повышение коэффициента корреляции при построении экспериментальной кривой усталости за счёт выбора её более точной математической модели.

**Изложение основного материала исследований.** В формулах (1) и (2) величина  $N_i$  представляет собой долговечность на соответствующем уровне напряжений, а это означает, что её значение связано с выбором математической модели кривой усталости. Для проведения сравнительного анализа рассмотрим наиболее распространённые и чаще всего применяемые модели – уравнение Вейбулла и степенное уравнение. Кроме того, рассмотрим также модернизированное уравнение Вейбулла, отличающееся от двух предыдущих более высоким коэффициентом корреляции [2].

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_w} \cdot N = 10^{C_w} ; \quad (5)$$

$$\sigma^{m_c} \cdot N = 10^{C_c} ; \quad (6)$$

$$(\sigma - A)^{m'_w} \cdot N = 10^{C'_w} , \quad (7)$$

где  $\sigma$  и  $N$  – переменные значения напряжения и числа циклов до разрушения соответственно;

$\sigma_R$  – предел выносливости;

$m_w, C_w, m_c, C_c, m'_w$  и  $C'_w$  – параметры.

Решив совместно уравнения (3) и (5), (3) и (6), а также (3) и (7) для случая непрерывного увеличения нагрузки, получим соответствующие зависимости для определения сумм накопленных повреждений.

$$a_w = \frac{(\sigma_P - \sigma_R)^{m_w+1} - (\sigma_1 - \sigma_R)^{m_w+1}}{\alpha(m_w + 1)10^{C_w}} ; \quad (8)$$

$$a_c = \frac{\sigma_P^{m_c+1} - \sigma_1^{m_c+1}}{\alpha(m_c + 1)10^{C_c}} ; \quad (9)$$

$$a'_w = \frac{(\sigma_P - A)^{m'_w+1} - (\sigma_1 - A)^{m'_w+1}}{\alpha(m'_w + 1)10^{C'_w}} , \quad (10)$$

где  $a_w$ ,  $a_c$  и  $a'_w$  – величины сумм накопленных повреждений соответственно для уравнений (5), (6) и (7);

$\sigma_p$  – напряжение, при котором произошло разрушение;

$\alpha = d\sigma/dN$  – скорость непрерывного увеличения нагрузки;

$\sigma_1$  – напряжение, соответствующее началу увеличения амплитуды напряжений.

Для расчёта сумм накопленных повреждений воспользуемся результатами испытаний лабораторных образцов, приведенными в работе [2].

С помощью зависимостей (8), (9) и (10) рассчитаем параметры этих уравнений, коэффициенты корреляции и значения сумм накопленных повреждений  $a_w$ ,  $a_c$  и  $a'_w$  для образцов из стали 45 и стали 40Х, гладких и с различными концентраторами напряжений, испытанных от разных начальных уровней напряжений и при различных скоростях увеличения амплитуды напряжений (табл.1).

Таблица 1

*Расчётные значения параметров уравнений кривых выносливости, коэффициентов корреляции и сумм накопленных повреждений*

Марка стали, тип образца, параметры, коэффициент корреляции	$\alpha$ , Па/цикл	$\sigma_1$ , МПа	$\bar{a}_c$	$\bar{a}_w$	$\bar{a}'_w$
1	2	3	4	5	6
Сталь 45, образцы гладкие (1 тип, $\alpha_\sigma = 1,029$ ), $\sigma_R = 250$ МПа; $m_C = 18,0832$ ; $C_C = 49,7649$ ; ( $R^2 = 0,7979$ ); $m_W = 2,1142$ ; $C_W = 8,5882$ ; ( $R^2 = 0,7609$ ); $m'_W = 43,4783$ ; $C'_W = 128,6739$ ; $A = -400$ МПа ( $R^2 = 0,8004$ ).	100	240	1,6440	1,5955	1,6264
		270	1,7855	1,8202	1,7612
		285	1,9455	1,8612	1,9309
	200	225	1,2175	1,1659	1,2082
		270	1,3823	1,2800	1,3798
		285	1,3952	1,2441	1,3971
Сталь 45, образцы с концентратором напряжений (2 тип, $\alpha_\sigma = 1,556$ ), $\sigma_R = 204,0$ МПа; $m_C = 13,0208$ ; $C_C = 36,6367$ ; ( $R^2 = 0,9342$ ); $m_W = 1,3990$ ; $C_W = 7,6512$ ; ( $R^2 = 0,8487$ ); $m'_W = 30,9598$ ; $C'_W = 90,9505$ ; $A = -329,0$ МПа ( $R^2 = 0,9346$ ).	50	180	1,1992	1,6886	1,1884
		230	1,0715	1,4799	1,0559
		250	0,7096	0,7928	0,7056
	100	180	1,7991	1,9323	1,8175
	200	180	2,2270	1,7998	2,3291

Продолжение табл.1

Сталь 45, образцы с концентратором напряжений (4 тип, $\alpha_\sigma = 2,6246$ ), $\sigma_R = 145,0$ МПа; $m_C = 6,6445$ ; $C_C = 20,9409$ ; ( $R^2 = 0,9386$ ); $m_W = 1,8688$ ; $C_W = 8,8397$ ; ( $R^2 = 0,9510$ ); $m'_W = 1,9759$ ; $C'_W = 9,0767$ ; $A = 142,0$ МПа. ( $R^2 = 0,9511$ ).	100	120	0,7011	0,7286	0,6899	
		170	0,6626	0,7303	0,7243	
		195	0,8095	0,9181	0,9100	
		220	0,5236	0,7269	0,7247	
	200	120	0,7450	0,7801	0,7775	
		170	0,7116	0,7829	0,7775	
		195	0,6341	0,7014	0,6967	
	400	120	0,6905	0,7013	0,7006	
		170	0,7429	0,7597	0,7583	
		195	0,7074	0,7184	0,7177	
	600	120	0,7635	0,7248	0,7271	
		145	0,8454	0,7876	0,7908	
		170	0,7984	0,7550	0,7571	
195		0,7850	0,7300	0,7329		
Средние значения			1,0599	1,0882	1,0754	
Сталь 40X, образцы гладкие (1 тип, $\alpha_\sigma = 1,029$ ), $\sigma_R = 274,0$ МПа; $m_C = 18,6567$ ; $C_C = 51,8190$ ; ( $R^2 = 0,8829$ ); $m_W = 1,9153$ ; $C_W = 8,2287$ ; ( $R^2 = 0,8701$ ); $m'_W = 8,6806$ ; $C'_W = 24,0903$ ; $A = 165$ МПа ( $R^2 = 0,8832$ ).	50	280	3,5505	3,8193	3,5639	
		310	3,8855	3,8854	3,8596	
		320	3,4216	3,1394	3,3566	
	100	280	5,7452	4,9069	5,5225	
	200	280	5,5955	3,7037	5,0754	
	Сталь 40X, образцы с концентр. напряжений (3 тип, $\alpha_\sigma = 1,7723$ ), $\sigma_R = 154,0$ МПа; $m_C = 7,9554$ ; $C_C = 23,9960$ ; ( $R^2 = 0,8412$ ); $m_W = 1,4695$ ; $C_W = 7,9902$ ; ( $R^2 = 0,7587$ ); $m'_W = 27,8552$ ; $C'_W = 84,9666$ ; $A = - 500$ МПа ( $R^2 = 0,8517$ ).	50	160	0,8488	1,0989	0,8213
			180	0,9366	1,2736	0,8905
			200	0,6291	0,8112	0,5968
Сталь 40X, образцы с концентр. напряжений (4 тип, $\alpha_\sigma = 2,6246$ ; $\sigma_R = 159,0$ МПа); $m_C = 7,7220$ ; $C_C = 23,0726$ ; ( $R^2 = 0,8925$ ); $m_W = 1,2847$ ; $C_W = 7,2879$ ; ( $R^2 = 0,8589$ ); $m'_W = 3,5778$ ; $C'_W = 12,3556$ ; $A = 105,0$ МПа ( $R^2 = 0,8958$ ).	50	130	3,2834	3,6556	3,8117	
		190	2,2125	2,6420	2,3259	
		210	1,5504	1,6221	1,5845	
	100	130	2,4496	2,6148	2,4969	
	200	130	2,6501	2,5218	2,6148	
	Средние значения			2,8276	2,7457	2,8093

Приведенные в табл. 1 результаты расчёта показывают, что уравнения (5) и (6) могут иметь более высокие коэффициенты корреляции по отношению друг к другу, однако их значения всегда ниже, чем при использовании модернизированного уравнения Вейбулла.

Наиболее близкий к единице результат для стали 45 соответствует степенному уравнению, в то же время для стали 40X он соответствует уравнению Вейбулла. При этом модернизированному уравнению Вейбулла в обоих случаях соответствует промежуточный результат. Из этого можно сделать вывод о том, что по близости суммы накопленных повреждений к единице нельзя судить о правильности выбора математической модели кривой усталости.

Значения погрешностей  $\delta_{R^2}$  величин  $R^2$ , а также погрешностей  $\delta_a^C$  и  $\delta_a^W$  сумм накопленных повреждений степенного уравнения и уравнения Вейбулла  $\bar{a}_C$  и  $\bar{a}_W$ , относительно значений  $\bar{a}'_W$  представлены в табл. 2.

Таблица 2

*Расчётные значения погрешностей величин  $\delta_{R^2}$  и погрешностей сумм накопленных повреждений  $\delta_a^C$  и  $\delta_a^W$*

Тип образца	$\delta_{R^2}, \%$	$\delta_a^C, \%$	$\delta_a^W, \%$	Тип образца	$\delta_{R^2}, \%$	$\delta_a^C, \%$	$\delta_a^W, \%$
Сталь 45, образцы гладкие (1 тип)	4,9	0,7	-3,6	Сталь 40X, образцы гладкие (1 тип)	1,5	3,8	9,0
Сталь 45, образцы с концентратором напряжений (2 тип)	9,2	-1,3	8,4	Сталь 40X, образцы с концентратором напряжений (3 тип)	10,9	4,6	37,9
Сталь 45, образцы с концентратором напряжений (4 тип)	1,3	-3,5	0,6	Сталь 40X, образцы с концентратором напряжений (4 тип)	4,1	5,4	1,7

### Выводы

1. Данные табл. 2 показывают, что использование модернизированного уравнения Вейбулла, позволяет существенно уточнить значение суммы накопленных повреждений. Для уравнения Вейбулла, в частности это уточнение в одном случае составило 37,9 %. Для степенного уравнения оно не превысило 10,9 %, однако и такой результат можно считать существенным.

2. Значения  $\delta_{R^2}$  достигают почти 11 %, что свидетельствует о больших возможностях увеличения коэффициента корреляции за счёт использования модернизированного уравнения Вейбулла в качестве модели кривой усталости.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
2. Коноплев А.В. Повышение точности построения кривой усталости при использовании трехпараметрического уравнения Вейбулла // Вісник ОНМУ. – 2007. – № 22. – С. 131-136.

*Стаття надійшла до редакції 30.09.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету  
**В.Д. Євдокімов**

УДК 624.131.53

И.В. Войтенко

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ  
ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ЕЕ ПРОЧНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ**

*В статье изложена практическая реализация предложенного автором метода определения бокового давления неоднородной грунтовой среды с учетом ее прочностной анизотропии в морском гидротехническом строительстве. Результаты исследований были использованы при проектировании и строительстве причальных сооружений Мариупольского морского торгового порта.*

**Ключевые слова:** прочностная анизотропия, годографы угла внутреннего трения и сцепления, боковое давление, неоднородная анизотропная грунтовая среда, причальное сооружение.

*В статті викладена практична реалізація запропонованого автором методу визначення бічного тиску неоднорідного ґрунтового середовища з урахуванням його міцнісної анізотропії в морському гідротехнічному будівництві. Результати досліджень були використані при проектуванні і будівництві причальних споруд Маріупольського морського торговельного порту.*

**Ключові слова:** міцнісна анізотропія, годографи кута внутрішнього тертя та зчеплення, бічний тиск, неоднорідне анізотропне ґрунтове середовище, причальна споруда.

*In the article practical realization of the method of determination of lateral pressure of heterogeneous soil offered an author is examined on marine hydrotechnical buildings taking into account the strength anisotropy of soil's environment. The results of researches were used for designing and building of berthes of the Marine Port of Mariupol.*

**Keywords:** anisotropy of strength, hodographs of friction angle and cohesion, lateral pressure, heterogeneous anisotropic soil's environment, berth building.

**Введение.** Строительство гидротехнических сооружений осуществляется в прибрежной зоне, геологические условия которой характеризуются слоистостью грунтовых отложений. Особенностью неоднородных отложений, как свидетельствуют многочисленные исследования, является анизотропия деформативных и прочностных характеристик.

К основным нагрузкам, определяющим напряженно-деформированное состояние портовых гидротехнических сооружений, относят боковое давление грунта. В настоящее время отсутствуют нормативные документы и рекомендации, регулирующие проектирование, строительство и эксплуатацию портовых сооружений с учетом прочностной анизотропии грунтовой среды.

В работах [1-3] предложена методика определения бокового давления неоднородного грунтового основания на подпорные сооружения с учетом анизотропии прочностных характеристик.

Посредством проведения численного исследования доказано существенное влияние ориентации годографов угла внутреннего трения и сцепления на параметры бокового давления грунта [4].

**Постановка задачи.** Задачей проведенных научных исследований является практическая реализация полученных результатов в практике строительства и эксплуатации распорных сооружений, в том числе портовых, которая кратко изложена в настоящей публикации.

**Изложение материала исследований.** В соответствии с предложенной методикой, боковое давление  $n$ -го слоя при произвольном залегании слоев и с учетом анизотропии прочностных характеристик определяется зависимостью

$$E_n = \gamma_n h_n^2 N_{\gamma,n} (1 + N_{cor,n}) + q_{n,c} h_n N_{q,n} + c_n (\beta_{1,n}) h_n N_{c,n}, \quad (1)$$

где  $\gamma_n$  – удельный вес  $n$ -го грунтового слоя;

$h_n$  – высота слоя при ее проекции на вертикаль;

$c_n = c_n(\beta_{1,n})$  – базовое сцепление на поверхности  $n$ -го слоя при ее ориентации  $\beta_{1,n}$ ;

$N_{\gamma,n}$ ,  $N_{q,n}$ ,  $N_{c,n}$  – коэффициенты, отражающие влияние соответственно собственного веса грунта в объеме предельной призмы, распределенной на поверхности призмы внешней нагрузки и внутренних сил связности, распределенных в соответствии с теоремой Како по контуру предельной грунтовой призмы;

$N_{cor,n}$  – коэффициент, учитывающий произвольное залегание слоев.

Анизотропия характеристик прочности произвольного  $n$ -го грунтового слоя представлена годографами угла внутреннего трения  $\varphi_n(\beta)$  и сцепления  $c_n(\beta)$ , удовлетворяющими зависимостям

$$\varphi_n(\beta) = \varphi_n(\beta + \pi); \quad c_n(\beta) = c_n(\beta + \pi), \quad (2)$$

где  $\beta$  – угол ориентации площадки сдвига относительно горизонта.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований бокового давления неоднородного анизотропного по сопротивлению сдвигу грунта использовались при проектировании причальных сооружений № 1, 7, 10, 18 Мариупольского морского торгового порта.

Инженерно-геологические условия объектов внедрения характеризуются резко неоднородными грунтовыми отложениями, сложенными текучими и текучепластичными илами, глинами и суглинками, которые переслаиваются пылеватыми и мелкозернистыми заиленными песками.

Условия определяют анизотропию прочностных свойств грунтового основания и соответствуют предпосылкам расчетной схемы предложенных ранее решений.

В районе причала № 18 в геологическом строении принимают участие аллювиально-морские отложения, представленные переслаиванием песков разной крупности (от мелких до гравелистых) с суглинками и глинами, в районе причала № 17 и Восточного мола – илами с ракушей и растительными остатками (в верхней части толщи).

С поверхности дна повсеместно залегают илы; преобладающими являются глинистые слаботекучие илы с ракушей и растительными остатками и прослойками песка. Реже, в виде отдельных прослоек и линз, встречаются илы суглинистые и супесчаные.

Основные характеристики физических и механических свойств грунтового основания приведены в таблице.

*Таблица основных инженерно-геологических характеристик  
грунтового основания в районе причала № 18*

Слои грунтового основания	$\Gamma$ (под водой), $\text{т/м}^3$	$I_p$	$I_L$	$E$ , мПа	$\varphi$ , <sup>0</sup>	$c$ , кПа
1. Илы темно-серые и глинистые с включением ракуши, очень текучие, разжиженные	0,44	0,22	2,4	0,5	5	3
2. Илы суглинистые и глинистые с включением ракуши и растительных остатков, слаботекучие	0,35	0,31	1,5	0,6	7	2
3. Глины желтовато-бурые с включением щебня, текучепластичные и мягкопластичные	0,77-0,80		0,7	0,7	13-14	18-20
4. Глины серые, тугопластичные и полутвердые	0,86-0,90		0,2	12	16-17	27-31

Объекты внедрения представляют собой причальные сооружения типа «больверк» с анкерровкой в одном уровне (рис. 1) или реконструируемые набережные – эстакады с использованием больверка – оторочки (причал № 1).

На рис. 2 приведен поперечный разрез причала № 18 в составе универсального терминала для металлогрузов и навалочных грузов. Отметка кордона причала – + 2,0, отметка дна у причала – - 9,75. Гибкая стенка из металлического шпунта погружена на отметку – -17,0.



Для улучшения строительных свойств слабого основания использовалось уплотнение виброиглой TR-75 фирмы Бауэр с устройством дрен из шлаков.

Данные для расчета по предложенной методике определялись по результатам стандартных срезных испытаний ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) [5].

Реализация разработанного метода определения бокового давления грунта осуществлялась проектной организацией в соответствии с действующими нормативными документами, регламентирующими проектирование гидротехнических сооружений.



*Рис. 3. Искусственная территория причала № 18  
с заполнением металлургическими шлаками  
меткомбинатов Азовсталь и Ильича г. Мариуполь*

Последующая эксплуатация грузовых причалов показала корректность расчетного метода, о чем свидетельствует удовлетворительное состояние сооружений в строительный и эксплуатационный периоды.

Опыт проектирования причальных сооружений гравитационного типа с учетом анизотропии грунтовых оснований показал возможность повышения глубин у причальных стенок без проведения дополнительных реконструктивных мероприятий, что значительно удешевляет стоимость строительства.

Необходимо также отметить, что разработанная методика позволяет учитывать сейсмическое воздействие, что совместно с учетом анизо-

тропии неоднородных грунтовых оснований определяет ее применение в сложных инженерно-геологических условиях.

**Выводы.** Таким образом, практическая реализация разработанного инженерного решения определения бокового давления неоднородной грунтовой среды с учетом прочностной анизотропии на распорные сооружения успешно осуществлена в морском гидротехническом строительстве. Результаты исследований могут быть использованы при разработке нормативной документации, регламентирующей проектирование, строительство и эксплуатацию портовых сооружений с учетом анизотропии прочностных характеристик контактирующей грунтовой среды.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Войтенко И.В. Алгоритм расчета бокового давления грунта анизотропных многослойных оснований // Вісник Одеського національного морського університету. – Одеса: ОНМУ. – 1998. – № 10. – С. 137-141.*
2. *Войтенко И.В. Учет нагрузки при определении бокового давления неоднородного анизотропного грунта // Зб. наук. праць Полтавського національного технічного університету ім. Кондратюка. – Полтава: Вид-во ПНТУ. – 2003. – № 12. – С. 39-46.*
3. *Войтенко И.В. Определение результирующей произвольно ориентированной поверхностной нагрузки в расчетах бокового давления многослойного анизотропного грунта при сейсме // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Вид-во ОДАБА. – 2004. – № 14. – С. 69-75.*
4. *Войтенко И.В. Влияние прочностной анизотропии на боковое давление грунтовой среды в сложных геотехнических условиях // Морские и речные порты. Портовые сооружения: Сб. научн. трудов ОГАСА. – Вып. 3. – Одесса: МАГВТ, 2009. – С. 19-23.*
5. *Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості: ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) / Основи та підвалини будинків і споруд. – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. – 102 с.*

*Стаття надійшла до редакції 20.09.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, Генеральний директор Міжнародної асоціації гідротехніків водного транспорту **А.В. Школа**

УДК 629.5 Е30

В.А. Нильва

### ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОРПУСА СУХОГРУЗНОГО СУДНА СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ ПРИ ПОТЕРЕ ЧАСТИ ПРОДОЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ

*В работе изложены расчетные модели повреждений корпуса судна смешанного плавания, упрощенный метод учета потери части продольных связей при повреждении.*

**Ключевые слова:** *судно смешанного река-море плавания, аварийные ситуации, модель повреждения, несущая способность корпуса.*

*В роботі викладено розрахункові моделі пошкодження корпусу судна змішаного плавання, наближений метод урахування втрати частини поздовжніх зв'язків при пошкодженні.*

**Ключові слова:** *судно змішаного плавання, аварійні ситуації, модель пошкодження, несуча здатність корпусу.*

*Design damage models for the hull of river-sea going vessel, approximate method, taking into account the loss of the part of longitudinals, are stated.*

**Keywords:** *river-sea going vessel, emergency situations, damage model, load-carrying strength of the hull.*

**Постановка проблемы.** При получении судном повреждения, которое не привело к его гибели, возникает необходимость оперативного принятия решений по дальнейшим действиям:

1. При столкновении, повреждении днища, допустимо ли команде оставаться на судне и бороться за его живучесть, или уже необходима эвакуация из-за угрозы перелома корпуса (например, от продолжающей поступать в пространство корпуса забортной воды).

2. При посадке на мель, возможно ли скорейшее снятие судна с мели, или же при проведении спасательных мероприятий произойдет окончательное разрушение корпуса, что затруднит (или делает невозможным) эксплуатацию судов на данном навигационном участке.

Для принятия таких решений требуется оценить с достаточной точностью состояние поврежденного судна, его остойчивость и прочность. Комплексный подход к оценке живучести поврежденного судна, предложенный Г.В. Егоровым [2-7] позволяет с достаточной точностью решить поставленную задачу.

Однако в диссертации [2] и последующих публикациях [3, 4, 5, 6, 7] речь шла о морских судах неограниченного района плавания, которые имеют, по сравнению с судами внутреннего и смешанного плавания,

существенно более высокий стандарт общей прочности и, соответственно, на них меньше влияют дополнительные нагрузки, которые возникают при аварийных ситуациях, тем более, когда имеет место потеря части продольных связей.

Это было наглядно продемонстрировано в сентябре 2003 года при спасении судна смешанного река-море плавания «Виктория» [12]. В соответствии с выполненным расчетным моделированием ситуации была успешно осуществлена судоподъемная операция, которая позволила предотвратить разлив значительного объема сырой нефти и поднять само судно в таком состоянии, чтобы сохранить его для последующего восстановления (т.е. без перелома корпуса).

Целью статьи является разработка упрощенного метода учета потери части продольных связей при оценке несущей способности аварийных корпусов сухогрузных судов смешанного и внутреннего плавания для служб аварийной поддержки и при расчетах аварийной прочности на ранних стадиях проектирования.

**Изложение основного материала.** Особенностью эксплуатации судов смешанного и внутреннего плавания, по сравнению с морскими судами, является значительное время их работы в условиях рек, каналов, узкостей, в связи, с чем значительно увеличивается вероятность столкновений и посадки судов на мель. При этом запасы общей прочности у судов такого типа безусловно меньше, чем у аналогичных судов неограниченного района плавания, соответственно возрастает вероятность перелома корпуса.

В аварийных ситуациях (столкновения, взрывы, посадки на мель и т.д.) происходит нарушение целостности конструкции, деформация и/или разрушение элементов конструкции (балок набора и листовых элементов).

Исключение поврежденных элементов из поперечного сечения корпуса судна (другими словами: размеры и тип повреждения) трудно унифицировать, опираясь на только статистические данные.

Поэтому в исследовании были использованы пять моделей повреждений, четыре из которых разработаны на основе соответствующих требований нормативных документов: Правил Российского Речного Регистра для судов внутреннего плавания [10, ПСВП, 13.1], Правил Российского Речного Регистра для судов смешанного плавания [11, ПССП, 13.1], Правил ЕЭК ООН перевозки опасных грузов по европейским внутренним водным путям ВОПОГ [1. 9.3.3.15] и Международной Конвенции МАРПОЛ [9, Правило 24] (см. таблицу 1), а пятая модель – трещина в комингсе – отражает наиболее опасное повреждение корпуса сухогрузного судна смешанного плавания, которое вместе с этим не редко при эксплуатации таких судов.

*Таблиця 1*

*Размеры расчетных повреждения по днищу и борту в соответствии с требованиями Правил РРР и международных Правил*

Характеристики		РРР (ПСВП)	РРР (ПССП)	ВОПОГ	МАРПОЛ
Борт	Длина	0,04L	L2/3/3	0,01L ( $\geq 5,0$ м)	L2/3/3 / 14,5 (меньшее)
	Глубина	0,075B / 0,9 м (меньшее)	B/5	0,59 м	B/5 или 11,5 (меньшее)
	Размер по вертикали	от ОП неограниченно вверх			
Днище	Длина	0,04L	L2/3/3 (0,3L от НП) / 5 м	0,01L ( $\geq 5,0$ м)	L/10 (0,3L от НП) / L/10 / 5 м
	Ширина	0,1B	B/6 / 5 м (меньшее)	3,0 м	B/6 / 10 м (меньшее, $\geq 5$ м)
	Размер по вертикали	0,05B / 0,8 м (меньшее)	B/15	0,49 м	B/15 / 6 м (меньшее)

Первые четыре модели, по сути, являются представлениями о последствиях посадок на мель или столкновений, которые закладываются соответствующими правилами в проектные расчеты аварийной посадки и остойчивости, поэтому их введение позволяет обеспечить создаваемому корпусу эквивалентную живучесть для всех последствий аварий – т.е. комплексный подход к борьбе за живучесть судов.

Модель «трещина в комингсе» подразумевает исключение конструкций продольного комингса из схемы эквивалентного бруса (например, комингс ПрБ), не затрагивая конструкции палубы и двойного борта.

В качестве объекта исследования использовалось сухогрузное судно смешанного плавания нового поколения проекта RSD44 «Волго-Дон макс» класса ( $L_{расч} = 138,9$  м,  $B = 16,5$  м, 52-169 шп. – средняя часть) [8].

Размеры повреждений корпуса судна проекта RSD44 представлены в таблице 2.

*Таблиця 2*

*Размеры повреждений корпуса судна (пр. RSD44) в соответствии с требованиями Правил*

Характеристики		РРР (ПСВП)	РРР (ПССП)	ВОПОГ	МАРПОЛ
Борт	Длина	5,556 м	8,94 м	13,89 м	-
	Глубина	0,9 м	3,3 м	0,59 м	-
	Размер по вертикали	от ОП неогр, вверх	от ОП неогр, вверх	от ОП неогр, вверх	-
Днище	Длина	5,556 м	8,94 м (0,3L), 5 м	13,89 м	13,89 м (0,3L), 5 м
	Ширина	1,65 м	2,75 м	3,0 м	16,5 м
	Размер по вертикали	0,8 м	1,1 м	0,49 м	1,1 м

При этом в отличие от работ [2, 6, 7], при моделировании поврежденных корпуса судна рассматривалось не только типовое сечение по средней части, но и сечение по 38 шп. – района носовой переборки машинного отделения (МО).

Известно, что суда смешанного плавания, имеющие, как правило, кормовые МО, жилую и рулевую рубки, достаточно часто получают переломы именно перед ними.

Соответственно, было выбрано сечение по 38 шп., где внешние нагрузки еще достаточно велики, а площадь поперечного сечения корпуса уменьшается: часть продольных связей (РЖ днища и двойного дна, продольный комингс) прерываются, участок главной палубы находится в зоне неэффективной (затененной) ширины от люкового выреза второго трюма.

В случае повреждения корпуса из схемы эквивалентного бруса (см. рисунок) исключается группа элементов суммарной площадью  $\Delta F$ , имеющей координаты  $Y_D$  и  $Z_D$  и собственные моменты инерции  $i_Y$  и  $i_Z$ .

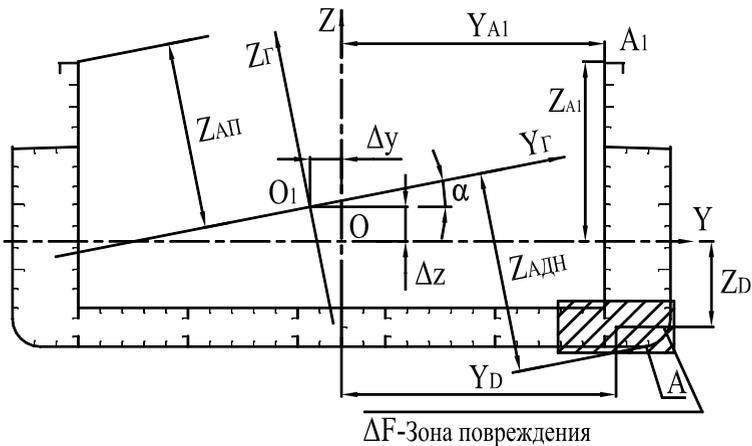


Рис. Схема поперечного сечения поврежденного сухогрузного судна

Площадь поперечного сечения неповрежденного исходного судна  $F_0$ ,  $y_0$  и  $z_0$  координаты центра тяжести, его моменты инерции  $I_Y$ ,  $I_Z$ .

Оси сравнения – главные центральные оси неповрежденного судна.

Изменение положения центра тяжести

$$\Delta z = -Z_D \Delta F / (F_0 - \Delta F),$$

$$\Delta y = -Y_D \Delta F / (F_0 - \Delta F).$$

Максимальные нормальные напряжения  $\sigma_{\Delta x}$ , возникающие в конструкциях поврежденного судна, в  $K_{\Delta}$  раз больше, чем исходные  $\sigma_0$ .

$$K_{\Delta} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} = \frac{Z_A}{Z_{A1}} \frac{I_Y}{I_{Yr}} \beta,$$

где

$$\beta = \cos \alpha \left( 1 + \frac{Y_A}{Z_A} \frac{I_{Yr}}{I_{Zr}} \operatorname{tg} \alpha \right),$$

$\alpha$ , рад – угол наклона главных осей  $O_1Z_r$  и  $O_1Y_r$  относительно центральных осей;

$I_{Yr}, I_{Zr}, \text{ м}^4$  – главные моменты инерции.

Характеристики  $\alpha, I_Y, I_Z, I_{Yr}, I_{Zr}$  определялись с помощью программы «ЭльБрус-МИБ».

$Y_A, Z_A, \text{ м}$  – координаты наиболее удаленной точки (поврежденное судно).

$Y_{A1}, Z_{A1}, \text{ м}$  – координаты наиболее удаленной точки (исходное судно).

При некоторых видах повреждений (повреждение борта при столкновении, шириной  $B/5$  и повреждение днища при посадке на мель, глубиной  $B/15$ ) в качестве  $Z_A$  используются 2 величины  $Z_{AП}$  и  $Z_{Дн}$ . Соответственно, определяется 2 величины  $K_{\Delta}$  для палубы и днища.

Коэффициент  $m$  характеризует, во сколько раз площадь поперечного сечения исходного судна больше площади поперечного сечения поврежденного.

$$m = 1 + \frac{\Delta F}{(F_0 - \Delta F)} = \frac{F_0}{(F_0 - \Delta F)}.$$

Расчет геометрических характеристик поперечных сечений (неповрежденных и поврежденных) и непосредственно повреждений производился по программе «ЭльБрус-МИБ».

В таблице 3 указаны геометрические характеристики неповрежденного корпуса, в таблицах 4 и 5 – поврежденного корпуса и повреждений соответственно (величины для миделевого сечения указаны в числителе, для 38 шп. – в знаменателе).

Таблица 3

*Геометрические характеристики неповрежденного корпуса судна  
(пр. RSD44)*

Характеристики	Мидель	38 шп.
$F_0, \text{ м}^2$	0,7926	0,5746
$Z_0, \text{ м}$	2,662	2,028
$Y_0, \text{ м}$	0	0
$I_Y, \text{ м}^4$	5,043	2,207
$I_Z, \text{ м}^4$	28,64	19,94

Таблиця 4

*Геометрические характеристики поврежденного корпуса  
при различных моделях повреждений (мидель/шт. 38)*

Характеристики		PPP (ПСВП)	PPP (ПССП)	ВОПОГ	МАРПОЛ	«Трещина»
Борт	$F_0-\Delta F$ , $M^2$	0,7176 / 0,5002	0,5209 / 0,3983	0,7239 / 0,5067	-	0,7046
	$Z_0$ , м	2,652 / 1,908	2,152 / 1,649	2,653 / 1,921	-	2,189
	$Y_0$ , м	-0,845 / -1,207	-3,632 / -3,144	-0,7746 / -1,095	-	-0,840
	$\alpha$ , рад	-0,00365 / -0,04502	-0,404 / -0,2516	-0,00321 / -0,03931	-	-0,1207
	$I_{YГ}$ , $M^4$	4,818 / 1,908	1,758 / 0,9859	4,857 / 1,960	-	3,273
	$I_{ZГ}$ , $M^4$	23,21 / 14,35	9,642 / 7,346	23,64 / 14,83	-	24,47
Днище	$F_0-\Delta F$ , $M^2$	0,7633 / 0,5495	0,7157 / 0,5060	0,7540 / 0,5363	0,3993 / 0,2731	-
	$Z_0$ , м	2,757 / 2,115	2,892 / 2,240	2,795 / 2,169	4,793 / 3,832	-
	$Y_0$ , м	-0,027 / -0,029	-0,1346 / -0,1773	-0,06351 / -0,09378	0,00 / 0,00	-
	$\alpha$ , рад	0,00224 / 0,001790	0,00953 / 0,008879	0,00553 / 0,005929	0,00 / 0,00	-
	$I_{YГ}$ , $M^4$	4,855 / 2,112	4,637 / 2,003	4,770 / 2,048	1,311 / 0,4578	-
	$I_{ZГ}$ , $M^4$	28,62 / 19,93	28,46 / 19,76	28,54 / 19,84	20,41 / 13,94	-
Скула	$F_0-\Delta F$ , $M^2$	0,7653 / 0,5494	0,7332 / 0,5342	0,7566 / 0,5439	-	-
	$Z_0$ , м	2,750 / 2,111	2,843 / 2,160	2,786 / 2,139	-	-
	$Y_0$ , м	-0,2640 / -0,3387	-0,5528 / -0,5405	-0,3245 / -0,3871	-	-
	$\alpha$ , рад	0,02305 / 0,02125	0,04671 / 0,03396	0,03004 / 0,02640	-	-
	$I_{YГ}$ , $M^4$	4,859 / 2,112	4,666 / 2,053	4,769 / 2,071	-	-
	$I_{ZГ}$ , $M^4$	27,10 / 18,51	25,66 / 17,73	26,89 / 18,42	-	-

Таблиця 5

*Геометрические характеристики поврежденных корпуса (мидель/шп. 38)*

Характеристики		PPP (ПСВП)	PPP (ПССП)	ВОПОГ	МАРПОЛ	«Трещина»
Борт	$\Delta F, \text{ м}^2$	0,07498 / 0,07447	0,2718 / 0,1764	0,06877 / 0,06796	-	0,08799
	$Z_0, \text{ м}$	2,759 / 2,836	3,640 / 2,886	2,758 / 2,833	-	6,456
	$Y_0, \text{ м}$	8,097 / 8,101	6,960 / 7,100	8,150 / 8,158	-	6,728
Днище	$\Delta F, \text{ м}^2$	0,02935 / 0,02522	0,07696 / 0,06871	0,03843 / 0,03843	0,3933 / 0,3015	-
	$Z_0, \text{ м}$	0,1919 / 0,1435	0,5250 / 0,4704	0,07235 / 0,07235	0,4995 / 0,3948	-
	$Y_0, \text{ м}$	0,6964 / 0,6206	1,250 / 1,302	1,301 / 1,301	0,00 / 0,00	-
Скула	$\Delta F, \text{ м}^2$	0,02729 / 0,02525	0,05946 / 0,04056	0,03605 / 0,03076	-	-
	$Z_0, \text{ м}$	0,2058 / 0,2288	0,4309 / 0,2959	0,07096 / 0,07697	-	-
	$Y_0, \text{ м}$	7,397 / 7,358	6,817 / 7,117	6,806 / 6,836	-	-

В таблице 6 приведены геометрические характеристики поперечных сечений (миделевое и 38 шп.) при различных вариантах повреждений (столкновение, посадка на камень в районе ДП, посадка на камень в районе скулы, посадка на мель, трещина в продольном комингсе).

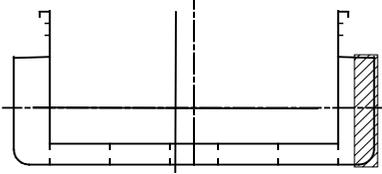
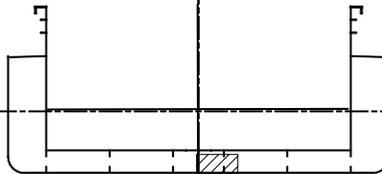
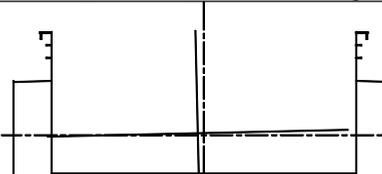
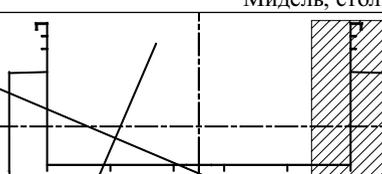
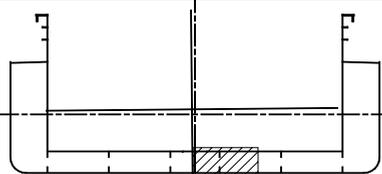
Расчет эквивалентного бруса по обычной методике или по приведенной выше схеме сложен и не всегда реально возможен в силу отсутствия или неполноты технической документации на стадии проектирования или в процессе аварийно-спасательных операций.

Анализ типовых повреждений показал, что изменение площади сечений  $m$ ; координат ЦТ площади сечения  $\Delta Z/H$ ,  $\Delta Y/B$ ; угла  $\alpha$ ; коэффициентов  $\beta$  и  $K_{\Delta}$  постоянны в пределах одного конструктивного типа сечения корпуса, поэтому данные таблицы 6 можно применять для оперативных расчетов и проектных расчетов сухогрузных судов смешанного плавания других проектов.

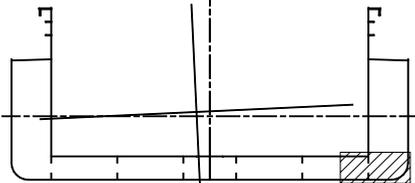
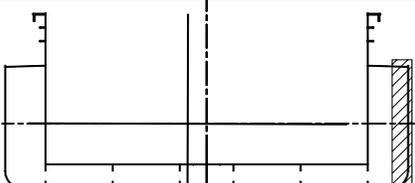
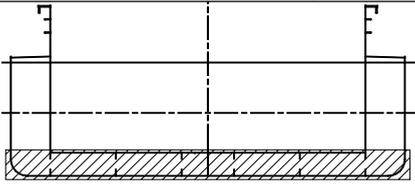
Проанализировав результаты моделирования повреждения «посадка на камень» в районе ДП и скулы, можно отметить, что значение  $K_{\Delta}$  больше при повреждении скулы. При этом поперечные размеры повреждения идентичны, исключаемая площадь больше при посадке на камень в районе ДП. Таким образом, большее влияние на  $\sigma_{\max}$  оказывает не площадь повреждения  $\Delta F$ , а отстояние  $Y_D$  группы поврежденных элементов от ДП.

Таблиця 6

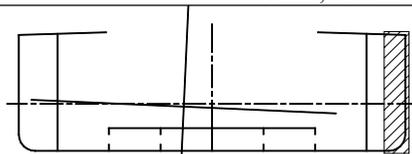
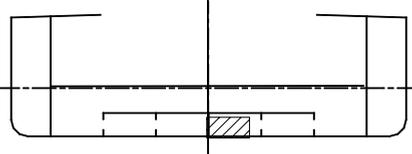
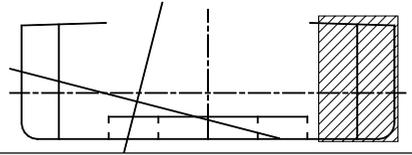
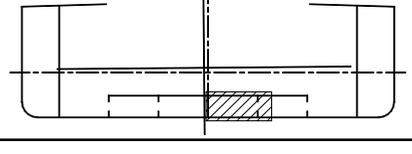
*Изменение характеристик поперечного сечения  
при различных моделях повреждений*

Схема повреждения	m	$\frac{\Delta_z/H}{\Delta_y/B}$	$\alpha$ , рад	$\beta$	$K_\Delta$
Мидель, столкновение, глубина 0,9 м					
	1,1045	-0,00203 / -0,0513	-0,00365	0,9988	1,054
Мидель, посадка на камень в районе ДП, глубина 0,8 м, ширина 1,65 м					
	1,0385	0,019 / -0,00162	0,00224	1,00056	1,021
Мидель, посадка на камень в районе скулы, глубина 0,8 м, ширина 1,65 м					
	1,0357	0,0175 / -0,016	0,02305	1,00533	1,057
Мидель, столкновение, глубина В/5					
	1,5218	-0,0102 / -0,2201	-0,404	0,8581	4,697 / 1,937
Мидель, посадка на камень в районе ДП, глубина В/15, ширина В/6					
	1,1075	0,04596 / -0,00815	0,00953	1,00224	1,049

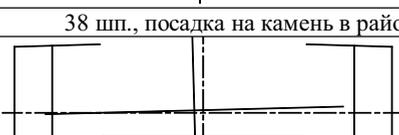
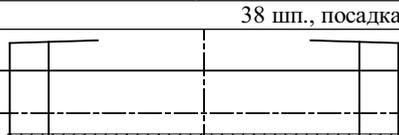
Продолжение табл. 6

Схема повреждения	m	$\frac{\Delta_z/H}{\Delta_y/B}$	$\alpha$ , рад	$\beta$	$K_\Delta$
Мидель, посадка на камень в районе скулы, глубина В/15, ширина В/6					
	1,0811	0,0362 / -0,0335	0,04671	1,00959	1,115
Мидель, столкновение, глубина 0,59 м					
	1,095	-0,00182 / -0,0469	-0,00321	0,9989	1,045
Мидель, посадка на камень в районе ДП, глубина 0,49 м, ширина 3,0 м					
	1,0510	0,0264 / -0,004	0,00553	1,00134	1,036
Мидель, посадка на камень в районе скулы, глубина 0,49 м, ширина 3,0 м					
	1,0476	0,0247 / -0,0196	0,03004	1,00665	1,079
Мидель, посадка на мель, глубина В/15					
	1,985	0,426 / 0,0	0,00	1,00	2,042 / 4,058

Продолжение табл. 6

Схема повреждения	m	$\frac{\Delta_z/H}{\Delta_y/B}$	$\alpha$ , рад	$\beta$	$K_\Delta$
Мидель, трещина комингса					
	1,1249	0,0948 / -0,051	-0,121	0,97	1,941 / 0,987
38 шп., столкновение, глубина 0,9 м					
	1,1489	-0,02406 / -0,0731	-0,04502	0,98314	1,345
38 шп., посадка на камень в районе ДП, глубина 0,8 м, ширина 1,65 м					
	1,0459	0,0173 / -0,00173	0,00179	1,00028	1,057
38 шп., посадка на камень в районе скулы, глубина 0,8 м, ширина 1,65 м					
	1,046	0,01654 / -0,0205	0,02125	1,00301	1,09
38 шп., столкновение, глубина В/5					
	1,4429	-0,076 / -0,1906	-0,2516	0,91248	4,181 / 1,867
38 шп., посадка на камень в районе ДП, глубина В/15, ширина В/6					
	1,1358	0,0423 / -0,0107	0,00887 9	1,00130	1,081

Продолжение табл. 6

Схема повреждения	m	$\frac{\Delta_z/H}{\Delta_y/B}$	$\alpha$ , рад	$\beta$	$K_\Delta$
38 шп., посадка на камень в районе скулы, глубина В/15, ширина В/6					
	1,0759	0,0263 / -0,0328	0,03396	1,00436	1,122
38 шп., столкновение, глубина 0,59 м					
	1,1341	-0,0216 / -0,0663	-0,03931	0,98533	1,286
38 шп., посадка на камень в районе ДП, глубина 0,49 м, ширина 3,0 м					
	1,0717	0,028 / -0,0057	0,00593	1,00089	1,078
38 шп., посадка на камень в районе скулы, глубина 0,49 м, ширина 3,0 м					
	1,0566	0,0221 / -0,0234	0,0264	1,00356	1,109
38 шп., посадка на мель, глубина В/15					
	2,104	0,3606 / 0,0	0,0	1,0	2,078 / 6,216

Попадание двойного борта (вместе с комингсом) или двойного дна в зону повреждения влечет за собой значительное увеличение наибольших нормальных напряжений (при бортовом повреждении в районе миделя  $K_\Delta = 4,51 / 1,86$ , при днищевом –  $K_\Delta = 2,04 / 4,06$ ).

Возникновение трещины в продольном комингсе – аварийная ситуация с высокой вероятностью наступления для сухогрузных судов смешанного плавания. При моделировании повреждения продольного комингса правого борта наибольшие нормальные напряжения возрастают в 1,94 раза для комингса правого борта и в 1,41 раза для комингса левого борта. Наибольшие нормальные напряжения в днищевых конструкциях остаются практически неизменными, по сравнению с исходным состоянием судна ( $K_\Delta = 0,987$ ).

**Вывод.** В соответствии с предлагаемым подходом, можно оперативно и с достаточной точностью определить геометрические характеристики поврежденного корпуса сухогрузного судна смешанного плавания и оценить уровень нормальных напряжений в наиболее удаленных точках поперечного сечения, что принципиально важно для расчетного обеспечения борьбы за живучесть и для проектных расчетов непотопляемости с учетом остаточной прочности корпуса.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов по внутренним водным путям (ВОПОГ). Т.1/ Организация объединенных наций. – Нью-Йорк, Женева, 2010.*
2. *Егоров Г.В. Разработка методов оптимизации прочностных решений при эксплуатации судов: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Одесса: ОИИМФ, 1993. – 431 с.*
3. *Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Определения и накопленный опыт // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2005. – Вип. 18. – С. 57-72.*
4. *Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Размеры повреждений и условия аварий // Проблеми техніки. – 2006. – № 1. – С. 3-23.*
5. *Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Критерии и примеры // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2006. – Вип. 19. – С. 49-63.*
6. *Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть (Учет стесненного кручения и крена) // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2006. – № 2. – С. 39-48.*
7. *Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть (учет потери части продольных связей) // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – № 3. – С. 38-50.*
8. *Егоров Г.В., Автутов Н.В., Багаутдинов Р.Д. Речные сухогрузные суда пр. RSD44 дедвейтом 5540 т с пониженным надводным габаритом // Судостроение. – 2012. – № 2. – С. 14-23.*
9. *Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. (МАРПОЛ 73/78). Приложение 1.*
10. *Правила Российского Речного Регистра. Т. 2 / Российский Речной Регистр. – М., 2008.*

11. *Правила Российского Речного Регистра. Т. 4/ Российский Речной Регистр. – М., 2008.*
12. *Сохранение прочности и остойчивости поврежденного судна при подъеме танкера «Виктория» / Г.В. Егоров, И.М. Чистяков, Б.Н. Станков, О.А. Ворона // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2007. – Вип. 21. – С. 7-21.*

*Стаття надійшла до редакції 15.10.2013*

**Рецензент** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Воробйова» Одеського національного морського університету **О.В. Демідюк**

УДК 69.05:658.-62:728.1

В.А. Гришин, А.В. Гришин

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКЛОНОВ (1)

*Рассматривается применение математического моделирования к проблеме нелинейного деформирования склонов.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, склоны, пластичность, оползни, устойчивость.

*Розглядається застосування математичного моделювання до проблеми нелінійного деформування схилів.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, напружено-деформований стан, схили, пластичність, зсуви, стійкість

*Application of mathematical modelling to a problem of nonlinear deformation of slopes is considered.*

**Keywords:** mathematical modelling, stressed-strain state, slopes, plasticity, landslips, stability

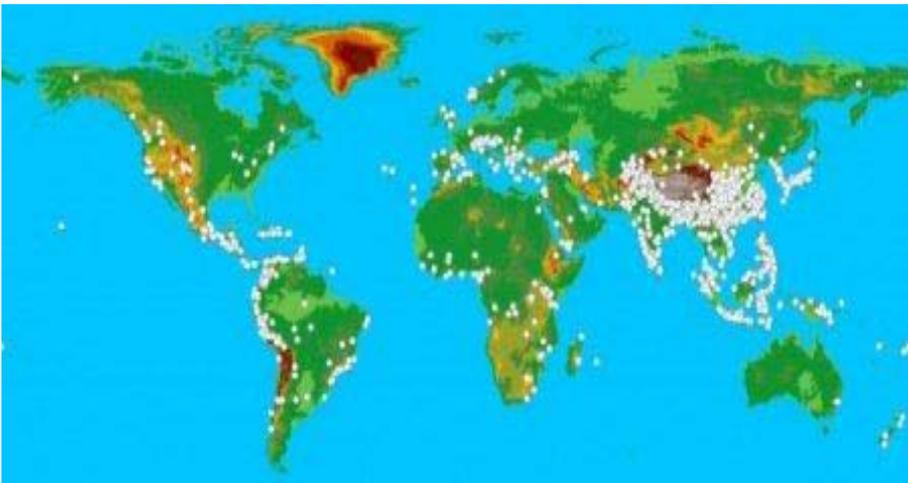
*Под моделью (от лат. *modulus* – мера, образец, норма) понимают такой материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания (изучения) замещает объект-оригинал, сохраняя некоторые важные для данного исследования типичные его черты. Процесс построения и использования модели называется моделированием.*

### **П.В.Трусов и др. Введение в математическое моделирование**

Профессор Д. Петли из университета Дарема составил базу данных происшедших оползней (не учитывались оползни от землетрясений) и карту смертности (рисунок 1) за период с 2004 по 2010 годы. За указанное время от 2 620 оползней, показанных на карте смертности белыми кружочками, погибло 32 322 человека.

Даже те неполные данные, приведенные на карте рисунка 1, показывают, какие огромные территории земли подвержены оползневым процессам. В настоящее и будущее время прогнозируется увеличение человечеством количества вновь осваиваемых земель, на которых могут возникать подвижки грунтовых массивов. Опасность для возводимых и существующих наземных и подземных сооружений могут представлять не

только склоны, на которых могут происходить разрушающие оползни, например, как показано на рисунке 2, но и территории земли, подверженные во времени медленным неравномерным смещениям. Совместный расчет по определению напряженного и деформированного состояний взаимодействующих между собой таких структур как сооружение, грунтовой массив, подземные и надземные воды, которые будем в дальнейшем называть реальной системой или материальным объектом (или просто объектом), играет очень важную роль при обосновании его надежной эксплуатации.



*Рис. 1. Карта смертности*



*Рис. 2. Оползень в горной местности*

Грунты и многие распространенные строительные материалы даже под незначительной нагрузкой работают в упруговязкопластическом состоянии, в котором возникающие напряжения и деформации существенно зависят от времени и последовательности их нагружения. Вообще, грунты, из которых формируются склоны, представляют собой очень сложные многофазные среды, свойства которых изменяются в процессе строительства и во время эксплуатации возведенных на них сооружений [1, 2]. Поэтому желательно, чтобы из бесконечного числа факторов, характеризующих реальную сложную систему, были учтены в расчетной системе только конечное их число, отражающих важнейшие ее свойства. При этом эти свойства должны быть реально определяемыми из опытных данных и допускающим в дальнейшем численную реализацию расчетной системы с применением ЭВМ. Следовательно, выбираемая нами расчетная система, которую называем моделью, не будет точно совпадать с реальной системой, но должна отражать ее основные свойства. Как выразили Артуро Розенблют и Норберт Винер: “наилучшей моделью кота является другой кот, а еще лучше – тот же самый кот”. Хотя модель “беднее” и неоднозначна материальному объекту, но, как правило, она доступнее, информативнее и удобнее для пользователя. Она также позволяет лучше понять основные свойства исследуемого объекта, прогнозировать последствия при изменении его свойств и различных на него воздействий.

В настоящее время наблюдается бурное развитие методов математического моделирования, которое привело к появлению огромного количества моделей самого разного типа [3, 4, 5]. Наиболее подробное их описание и классификация изложена в указанной выше ссылке на литературу. Следует отметить, что такой подход в научных исследованиях является сейчас наиболее применяемым и результативным. Как показано в [4], постановку вопроса о математическом моделировании можно разбить на три этапа: модель – алгоритм – программа. Кратко рассмотрим эти этапы и применительно к склонам.

На первом этапе математического моделирования объекта в виде склона должно предшествовать мысленное создание идеального его образа в виде компактного и наиболее простого представления, которое называется когнитивной моделью. Она в свою очередь состоит из трех последовательных моделей. Первая из них, оформленная в словесной форме в виде технического задания на проектирование модели склона, называется содержательной моделью. В этом словесно-смысловом описании объекта содержатся цели исследования и некоторые упрощения. Затем, на основании такой технической постановки проблемы, разрабатывается на новом уровне знаний вторая модель, в которой отбрасываются все несущественные факторы и она формулируется в терминах математики, механики грунтов, механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и называется концептуальной моделью. На следующем уровне эта модель реализуется в виде математических формул, которые получены на основании фундаментальных законов природы, и представляют третью математическую модель склона, которая в дальнейшем исследуется теоретическими методами. Здесь остановимся подробнее на создании только математической модели склонов.

Модель грунта представляет собой среду, называемую материальным континуумом, которая состоит из скелета и связанного пористого пространства, непрерывно ее заполняющие. Ее поры обычно содержат текучую фильтрующую газожидкостную смесь. Скелет состоит из твердых частиц, которые включают закрытую пористость, возможно заполненную насыщаемой жидкостью, но через которую отсутствует ее фильтрация. Возможно, что газожидкостная смесь содержит только несжимаемую жидкость. Бесконечно малый элемент такой непрерывной гетерогенной среды, который также называется материальной частицей, изображен на рисунке 3. Он представляет собой суперналожение двух континуумов: скелета и жидкости, заполняющей связанное пористое пространство. При этом перемещения твердых частиц скелета относительно друг друга игнорируются.

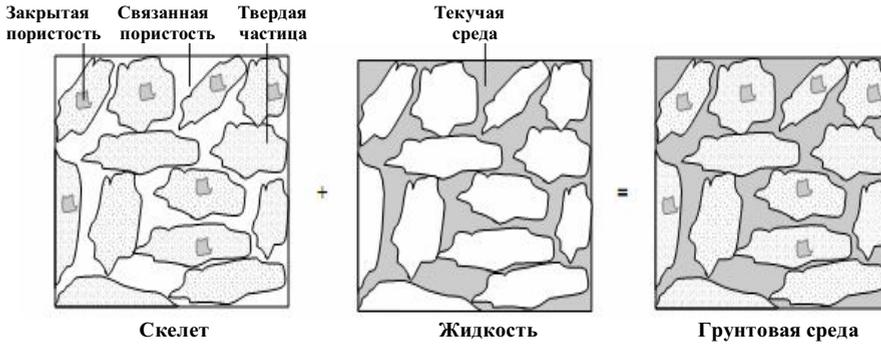
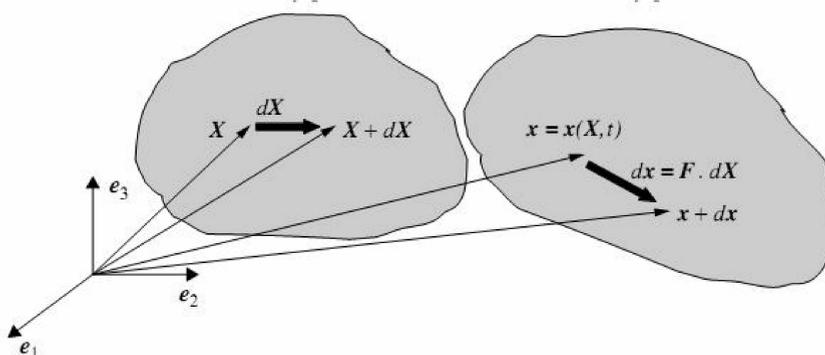


Рис. 3. Модель грунтовой среды

Еще раз подчеркнем, что такая грунтовая среда представлена не в дискретном виде, а как модель сплошной деформируемой среды. При этом ее элементарный объем во много раз превышает размер частиц скелета грунта. Но образец грунта, используемый для определения его механических свойств, и сам массив грунтовой среды, напряженно-деформируемое состояние которого определяется, должны быть значительно больше размера элементарного объема.

Мерой количественной оценки напряженно-деформированного состояния деформируемого массива являются осредненные в таком бесконечно малом элементе перемещения, деформации и напряжения, возникающие в нем от действия внешних и внутренних сил и принимаемые как истинные. Теория их определения базируется на аксиомах, которые приводят к теоретическим результатам, находящимися в согласии с наблюдаемыми экспериментальными фактами. Так их характеризующие тензоры первого и второго порядка считаются непрерывно дифференцируемыми достаточное число раз по координатам и по времени, следовательно, они ограничены вместе с их производными в области грунтовой среды. Для их определения необходимо обычно решать краевую задачу, содержащую систему геометрических, статических и физических уравнений при начальных и граничных условиях. Вначале без вывода приведем первые два типа этих уравнений. Они имеют место для любых сплошных деформируемых сред.

**Геометрические уравнения.** Под действием внешних сил элемент скелета непрерывной грунтовой среды, содержащей несжимаемую жидкость, перемещается и деформируется, как показано на рисунке 4.



*Рис. 4. Перемещение грунтовой среды*

Для определения перемещений частиц скелета, в трехмерном евклидовом пространстве введена произвольная неподвижная прямоугольная система координат с ортонормированным базисом  $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{e}_2$ ,  $\mathbf{e}_3$ , которая не оказывает влияние на протекание физических явлений в грунтовой среде, и время  $t$ . В момент времени  $t = 0$  положение такой частицы в исходной конфигурации грунтовой среды определяется вектором  $\mathbf{X}$ , а при  $t > 0$  в текущей конфигурации она фиксируется вектором  $\mathbf{x}$ . Для сокращения записи используется индексное обозначение. Поэтому эти два вектора определяются в виде

$$\mathbf{X} = X_i \mathbf{e}_i ; \quad \mathbf{x} = x_i(X_j, t) \mathbf{e}_i , \quad (1)$$

где индексы  $i$  и  $j$  принимают значения 1, 2, 3. Индексы, повторяющиеся дважды в одном элементе выражения, означают суммирование по ним от 1 до 3. Индексы, повторяющиеся во всех элементах выражения, указывают на количество этих выражений.

В окрестности частицы  $\mathbf{X}$  исходной конфигурации, которая также принадлежит скелету, определяется бесконечно малый вектор приращения  $d\mathbf{X}$ , присоединенный к частице. В текущей конфигурации он становится вектором  $d\mathbf{x}$ , который определяется через вектор  $d\mathbf{X}$  как

$$d\mathbf{x} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} dX_j \mathbf{e}_i , \quad (2 \text{ a})$$

что эквивалентно записи

$$d\mathbf{x} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X} , \quad (2 \text{ в})$$

где  $\mathbf{F}$  называют градиентом деформации.

Вектор  $d\mathbf{X}$  определяется через вектор  $d\mathbf{x}$  и, наоборот, по формулам

$$d\mathbf{X} = \mathbf{F}^{-1} \cdot d\mathbf{x}; \quad d\mathbf{x} = d\mathbf{X} \cdot \mathbf{F}^t. \quad (3)$$

Обозначаем через  $\mathbf{u}(\mathbf{X}, t)$  вектор перемещения частицы из исходной конфигурации  $\mathbf{X}$  в текущую конфигурацию  $\mathbf{x}$ . Тогда тензор конечной деформации Грина-Лагранжа находится как [1, 2]

$$\Delta = \frac{1}{2} (\nabla_{\mathbf{X}} \mathbf{u} + \nabla_{\mathbf{X}}^t \mathbf{u} + \nabla_{\mathbf{X}}^t \mathbf{u} \cdot \nabla_{\mathbf{X}} \mathbf{u}) \quad (4 \text{ а})$$

или в компонентной форме, которая удобна для вычислений, в виде

$$\Delta_{ij} = \left( \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right). \quad (4 \text{ в})$$

При решении многих задач механики грунтов достаточно считать деформации малыми. В этом случае вместо тензора деформации Грина-Лагранжа применяется линеаризованный тензор деформации [1, 2], который вычисляется по недеформируемой схеме склона и имеет следующий вид

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla^t \mathbf{u}); \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (5)$$

Введем обозначение  $(\ )_{,k} = \frac{\partial (\ )}{\partial x_k}$ . В этом случае вторую формулу из (5) можно записать более компактно как

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (5 \text{ а})$$

Полученные уравнения часто называют соотношениями Коши.

Тензор деформаций записывается в компонентной форме в виде

$$\mathbf{T}_{\boldsymbol{\varepsilon}} = \varepsilon_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j, \quad [\varepsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$  при  $i \neq j$ , т. е. этот тензор симметричный.

Вводится шестимерное пространство  $\mathbf{T}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ , в котором координаты точки равны компонентам тензора  $\mathbf{T}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ . Три компоненты  $\varepsilon_{ij}$  при  $i \neq j$  в связи с симметрией  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$  исключаются. Каждому тензору  $\mathbf{T}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$  в

пространстве  $\Pi_{\varepsilon}$  можно сопоставить вектор  $\mathbf{\varepsilon}$ , компоненты которого образуют матрицу столбец

$$\mathbf{\varepsilon} = [\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{33} \ \varepsilon_{12} \ \varepsilon_{23} \ \varepsilon_{32}]^t. \quad (7)$$

Тензор деформаций представляется в виде суммы девиатора деформации  $\mathbf{T}_{\varepsilon^*}$  и шарового тензора  $\mathbf{T}_{\varepsilon_0}$ . Его компоненты определяются как

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^* + \varepsilon_0 \delta_{ij}, \quad (8)$$

где  $\delta_{ks}$  – символ Кронекера,  $\varepsilon_{ij}^*$  – компоненты девиатора деформации,

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}, \quad k = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Базисные инварианты тензора деформаций и девиатора деформаций записываются в виде

$$I_1(\mathbf{T}_{\varepsilon}) = \varepsilon_{ii}, \quad I_2(\mathbf{T}_{\varepsilon}) = \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ji}, \quad I_3(\mathbf{T}_{\varepsilon}) = \varepsilon_{ij} \varepsilon_{jk} \varepsilon_{ki}; \quad (10)$$

$$I_1(\mathbf{T}_{\varepsilon^*}) = 0, \quad I_2(\mathbf{T}_{\varepsilon^*}) = \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^* \varepsilon_{ji}^*, \quad I_3(\mathbf{T}_{\varepsilon^*}) = \frac{1}{3} \varepsilon_{ij}^* \varepsilon_{jk}^* \varepsilon_{ki}^*; \quad (11)$$

Комбинируя базисные инварианты, можно получить новую систему из трех независимых инвариантов, которые будут часто использоваться в последующем изложении:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3} I_1(\mathbf{T}_{\varepsilon}), \quad \varepsilon_i = \sqrt{I_2(\mathbf{T}_{\varepsilon})},$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{I_3(\mathbf{T}_{\varepsilon})}}{2(I_2(\mathbf{T}_{\varepsilon}))^{3/2}}\right), \quad -\frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{\pi}{6}. \quad (12)$$

Главные деформации определяются через (12) при условии  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$  по формулам

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_i \sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) + \varepsilon_0, & \varepsilon_2 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_i \sin\varphi + \varepsilon_0, \\ \varepsilon_3 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_i \sin\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) + \varepsilon_0. \end{aligned} \quad (13)$$

При приращении действующей нагрузки в грунтовом массиве будут возникать приращения деформации  $d\varepsilon_{ij}$  и приращения перемещения  $du_i$ . Соотношения Коши в приращениях будут определяться как

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial du_i}{\partial x_j} + \frac{\partial du_j}{\partial x_i} \right). \quad (5 б)$$

**Статические уравнения.** Под действием внешних сил в каждой точке на гранях бесконечно малого элемента, вырезанного из грунтовой среды, возникают напряжения. Проекции их средних значений на оси координат с ортонормированным базисом  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$  показаны на рисунке 5. На этом же рисунке изображен повернутый элементарный объем таким образом, что на его гранях действуют только главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Изменение напряжений в элементарном объеме называется процессом нагружения, а изменение его деформаций – процессом деформирования.

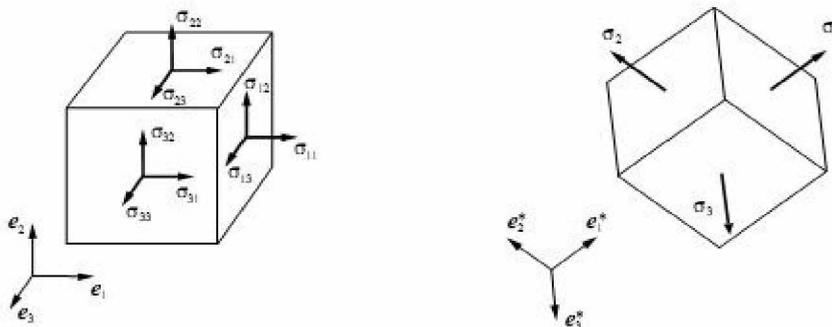


Рис. 5. Элементарный объем грунтовой среды

Тензор напряжений определяется в виде

$$\mathbf{T}_\sigma = \sigma_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j, \quad [\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  при  $i \neq j$ , т. е. этот тензор также симметричный.

Тензору  $\mathbf{T}_\sigma$  можно сопоставить в шестимерном пространстве  $\Pi_\sigma$  следующий вектор напряжений:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{12} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{32}]. \quad (15)$$

Тензор напряжений  $T_\sigma$  можно представить в виде суммы девиатора напряжений  $T_s$  и шарового тензора  $T_{\sigma_0}$ . В компонентной форме он определяется в виде

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \sigma_0 \delta_{ij}, \quad (16)$$

где  $\delta_{ks}$  – символ Кронекера ( $\delta_{ks} = 1$  при  $k = s$  и  $\delta_{ks} = 0$  при  $k \neq s$ ),  $s_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_{kk}, \quad k = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Вводятся следующие базисные инварианты тензора напряжений и девиатора напряжений

$$J_1(T_\sigma) = \sigma_{ii}, \quad J_2(T_\sigma) = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ji}, \quad J_3(T_\sigma) = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki}; \quad (18)$$

$$J_1(T_s) = 0, \quad J_2(T_s) = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ji}, \quad J_3(T_s) = \frac{1}{2} s_{ij} s_{jk} s_{ki}. \quad (19)$$

Комбинируя базисные инварианты, можно получить новую систему из трех независимых инвариантов, которые будут часто использоваться в последующем изложении:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} J_1(T_\sigma), \quad \sigma_i = \sqrt{J_2(T_s)},$$

$$\psi = \left( -\frac{3\sqrt{3} J_3(T_s)}{2(J_2(T_s))^{3/2}} \right), \quad -\frac{\pi}{6} < \psi < \frac{\pi}{6}. \quad (20)$$

Эти инварианты имеют ясный физический смысл. Так, первый инвариант  $\sigma_0$  характеризует среднее нормальное напряжение. Вторым инвариантом  $\sigma_i$  представляет интенсивность касательных напряжений, и он с точностью до постоянного множителя совпадает со средним касательным напряжением  $\tau_i = 0,633 \sigma_i$ . Третий инвариант  $\psi$  определяет вид напряженного состояния.

Через инварианты (20) главные напряжения определяются при условии  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i \sin\left(\psi + \frac{2}{3} \pi\right) + \sigma_0, & \sigma_2 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i \sin \psi + \sigma_0, \\ \sigma_3 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i \sin\left(\psi + \frac{2}{3} \pi\right) + \sigma_0.\end{aligned}\tag{21}$$

Рассматривая равновесие элементарного объема, и проектируя на оси координат все действующие на него силы, получаем три уравнения равновесия, которые в компактной форме имеют следующий вид [1, 2]:

$$\sigma_{ij,i} + Q_j = 0.\tag{22}$$

Здесь все индексы принимают значения от 1 до 3, но индекс  $j$  указывает на номер уравнения (их три), а по индексу  $i$  идет суммирование первого слагаемого из (22) (в каждом уравнении этих слагаемых тоже три).

Также из условий равновесия элементарного объема в виде тетраэдра получаем уравнения равновесия на поверхности  $S_q$ , на которой действует нагрузка  $q$ . Они имеют в компонентной форме следующий вид [1, 2]:

$$\sigma_{ij} n_i - q_j = 0,\tag{23}$$

где  $n_i$  проекции на оси координат нормали к поверхности  $S_q$ . Индексы  $i$  и  $j$  выполняют такое же назначение, что и в предыдущей формуле.

В приращениях напряжений  $d\sigma_{ij}$  и приращениях нагрузок  $dQ_i$ ,  $dq_i$  уравнения равновесия записываются как

$$d\sigma_{ij,i} + dQ_j = 0,\tag{22 а}$$

$$d\sigma_{ij} n_i - dq_j = 0.\tag{23 а}$$

**Уравнения состояния.** Эти уравнения устанавливают связь между напряжениями и деформациями или их приращениями и совместно со статическими и кинематическими уравнениями образуют замкнутую систему, решая которую можно определить напряженно-деформированное состояние в любой частице грунтового массива. При упругопластическом деформировании грунтов в них могут возникать как упругие, так и пластические деформации. Для них принимается, что результат деформирования не зависит от скорости процесса нагружения в данное напряженное состояние. Если деформации малы, то выполняется постулат суммирования [2], который позволяет общие деформации и их приращения разде-

лить на упругие и пластические составляющие. Его можно представить в виде

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(e)} + \varepsilon_{ij}^{(p)}, \quad (24)$$

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{(e)} + d\varepsilon_{ij}^{(p)}. \quad (25)$$

Здесь индекс  $(e)$  относится к упругим деформациям, а индекс  $(p)$  – к пластическим.

Упругие деформации или их приращения определяются по формулам

$$\varepsilon_{ij}^{(e)} = C_{ijks}^{(e)} \sigma_{ks}, \quad (26)$$

$$d\varepsilon_{ij}^{(e)} = C_{ijks}^{(e)} d\sigma_{ks}. \quad (27)$$

Результат деформирования упругого тела полностью определяется результатом нагружения и не зависит от вида и скорости процесса нагружения. Так при любых траекториях нагружения, приводящих в одно и тоже напряженное состояние, результирующая деформация будет одинаковой. Для пластических тел это свойство не выполняется. Пластическое поведение грунтовых сред можно описать, если определены следующие три понятия. Первое – условие начала пластического течения. Второе – закон течения, связывающий приращение пластической деформации с напряжениями и их приращениями. Третье – закон упрочнения, устанавливающий изменение течения, начиная с некоторого пластического состояния.

Одним из основных положений теории течения упругопластических сред, вытекающих из этих условий, является существование в пространстве напряжений кусочно-гладкой поверхности, заданной уравнением [6, 7]

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^{(p)}, \chi_m, d_m) = 0, \quad (28)$$

которая разделяет области упругости при  $f < 0$  и пластичности при  $f = 0$ . Данная поверхность может меняться от точки к точке грунта. Если в соотношении (28) параметры упрочнения  $\chi_m$  и пластические деформации  $\varepsilon_{ij}^{(p)}$  равны нулю, то это соотношение будет зависеть только от напряжений  $\sigma_{ij}$  и параметров  $d_m$ , характеризующих механические свойства

деформируемой среды. В этом случае  $f_0(\sigma_{ij}, d_m)$  называется функцией текучести, а  $f_0(\sigma_{ij}, d_m) = 0$  является условием начала пластического течения и называется поверхностью текучести. Такая модель грунта без упрочнения, называемая идеальной пластичностью, фиксирует только два его состояния: 1) допредельное, когда грунт деформируется только упруго и пластические деформации не возникают; 2) предельное, когда деформирование сопровождается безграничным накоплением пластических деформаций и грунт разрушается. В этом случае функция текучести и упругая область не зависят от истории нагружения элемента.

Для упрочняющихся материалов поверхность, представленная уравнением (28), может изменяться при изменении напряженного состояния. В этом случае она называется поверхностью нагружения, а  $f$  – функцией нагружения. Если в каждой точке этой поверхности функция нагружения дифференцируема по  $\sigma_{ij}$ , то она имеет в каждой из них единственную нормаль и называется регулярной. Для такой точки введем три понятия: разгрузка (пассивное нагружение), нейтральное нагружение и активное нагружение.

Пусть некоторое напряженное состояние соответствует точке нагружения, расположенной на регулярной поверхности (28). От действия последующего приращения нагрузки произошло изменение этого состояния, которое определяется одним из следующих условий:

$$1) \quad df < 0; \quad d'f < 0; \quad f = 0 \quad \text{или} \quad f < 0, \quad (29)$$

что соответствует разгрузке, когда  $\chi_m = 0$ ,  $d\varepsilon_{ij}^{(p)} = 0$ ;

$$2) \quad df = 0, \quad d'f = 0, \quad f = 0, \quad (30)$$

что соответствует нейтральному нагружению, когда  $\chi_m = 0$ ,  $de_{ks}^{(p)} = 0$ ;

$$3) \quad df = 0, \quad d'f > 0, \quad f = 0, \quad (31)$$

этот случай соответствует процессу активного нагружения, когда  $\chi_m \neq 0$ ,  $d\varepsilon_{ij}^{(p)} \neq 0$ , т. е. возникают необратимые деформации.

Сингулярные точки нагружения рассмотрены в [1, 7].

Закон течения основан на принципе максимума Мизеса или на постулате Драккера. В [2] показано, что постулат Драккера накладывает более жесткие ограничения на свойства материала, чем принцип максимума, который для гладкой функции нагружения можно представить как

$$\left( \sigma_{ks} - \sigma_{ks}^* \right) \varepsilon_{ks}^p \geq 0, \quad (32)$$

$$\left( \sigma_{ks} - \sigma_{ks}^* \right) d\varepsilon_{ks}^p \geq 0, \quad (33)$$

Из этих неравенств следует два положения: 1) поверхность нагружения для любого напряженного состояния  $\sigma$  не может быть вогнутой; 2) вектор приращения пластической деформации  $d\varepsilon^p$  в регулярной точке поверхности нагружения должен быть направлен по ее внешней нормали  $n$ .

Материал, для которого выполняется следующее неравенство, называется устойчивым

$$d\sigma_{ks} d\varepsilon_{ks}^p \geq 0. \quad (34)$$

Приращения пластических деформаций на основании принципа максимума Мизеса [2] записываются в окрестности регулярной точки функции нагружения  $f$  в виде

$$d\varepsilon_{ij}^{(p)} = d\lambda f_{,\sigma_{ij}}, \quad (35)$$

где  $d\lambda = const > 0$ ,  $f_{,\sigma_{ij}} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$ . Постоянная  $d\lambda$  находится из условия непрерывного изменения поверхности нагружения, что соответствует уравнению  $df = 0$

$$d\lambda = h^{-1} df, \quad (36)$$

где  $h$  — функция упрочнения, которая определяется как

$$h = - \frac{(f_{,\varepsilon_{mn}^p} f_{,\sigma_{mn}}) f_{,\sigma_{ij}} d\sigma_{ij}}{f_{,\sigma_{ks}} d\sigma_{ks} + f_{,\chi_{\kappa}} d\chi_{\kappa}}. \quad (37)$$

Подставляя (36) в (35), после преобразований находим

$$d\varepsilon_{ij}^{(p)} = C_{ijmn}^{(p)} d\sigma_{mn}, \quad (38)$$

$$C_{ijmn}^{(p)} = h^{-1} f_{,\sigma_{ij}} f_{,\sigma_{mn}}. \quad (39)$$

В монографии [8] на конкретных примерах показано, что теория пластического течения без упрочнения для грунтов не подтверждается результатами экспериментальных исследований, поэтому не рекомендуется ее использовать в расчетах по следующим двум основным причинам:

1. Она неверно прогнозирует объемные деформации, что в некоторых случаях приводит к отрицательным поровым давлениям.

2. В допредельном по прочности состоянии она учитывает только упругие деформации и не в состоянии учесть накопление существенных пластических деформаций.

Среди множества рассмотренных к настоящему времени законов упрочнения можно выделить два основных типа: изотропное и анизотропное упрочнение. В случае изотропного упрочнения грунтовая среда должна сохранять свойство изотропии в течение всего процесса пластического деформирования, а функции нагружения остаются инвариантными относительно преобразования системы координат. При активном нагружении происходит расширение поверхности нагружения. В [2] доказано, что модель изотропного упрочнения принадлежит к неустойчивым процессам пластического деформирования и для материалов, обладающих таким свойством, не выполняется основное неравенство устойчивости грунта (34). Также при изотропном упрочнении не учитывается эффект анизотропии, возникающий при пластическом течении, и эффект Баушингера, который проявляется при циклическом и динамическом нагружении. По теории течения с изотропным упрочнением получают удовлетворительные результаты решения только при путях нагружения близких к простым.

Простейший вариант теории анизотропного упрочнения – кинематическое упрочнение, предложенное В. Прагером [9], В.В. Новожиловым и Ю.И. Кадашевичем [10], устанавливает, что при пластическом деформировании поверхность нагружения перемещается в пространстве напряжений, как абсолютно твердое тело, сохраняя размеры, форму и ориентацию первоначальной поверхности текучести. Если перемещение центра поверхности текучести обозначить через вектор  $\rho$  (компоненты  $\rho_{ks}$ ), то функцию нагружения можно представить в следующем виде:

$$f(\sigma_{ks} - \rho_{ks}) = 0, \quad (40)$$

где  $\rho_{ks}$  называется также тензором остаточных микронапряжений, а

$$\sigma_{ks}^{\circ} = \sigma_{ks} - \rho_{ks} \quad (41)$$

тензором активных напряжений.

Тензор  $\rho_{ks}$  равен нулю до момента появления первых пластических деформаций, остается постоянным при нейтральном нагружении и изменяется при активном нагружении. Его можно представить как

$$\rho_{ks} = a_{ksnm} \varepsilon_{nm}^p, \quad (42)$$

$$\rho_{ks} = a \varepsilon_{ks}^p, \quad (43)$$

где  $a$  – постоянная величина, определяемая из эксперимента.

В работе [10] предложено принимать вместо тензора  $a_{ksnm}$  функцию инвариантов  $\rho_{ks}$ . В этом случае поверхность нагружения не только перемещается в пространстве напряжений, но и расширяется, сохраняя свою форму. Это позволяет получать результаты, хорошо согласующие с экспериментальными данными.

Обращая формулы (27) и (34), получим уравнения состояния в виде

$$d\sigma_{ij} = D_{ijnm}^{(ep)} d\varepsilon_{nm} \quad \text{если } f = 0, df' > 0;$$

$$d\sigma_{ij} = D_{ijnm}^{(e)} d\varepsilon_{nm} \quad \text{если } f = 0, df' \leq 0 \text{ или } f < 0, \quad (44)$$

где  $D_{ijnm}^{(ep)}$  определено при изотропном упрочнении как [1]

$$D_{ijnm}^{(ep)} = D_{ijnm}^{(e)} - \frac{f_{,\sigma_{ij}} D_{ijnm}^{(e)} f_{,\sigma_{nm}} D_{ijnm}^{(e)}}{f_{,\sigma_{ij}} D_{ijnm}^{(e)} f_{,\sigma_{nm}} - f_{,\chi} \sigma_{ks} f_{,\sigma_{ks}}}. \quad (45)$$

При кинематическом упрочнении уравнения состояния имеют также вид (44), но в уравнении (45) вместо подчеркнутого выражения необходимо поставить  $f_{,\rho_{nm}} \rho_{nm} \underset{\varepsilon_{ks}^{(p)}}{f_{,\sigma_{ks}}}$  [1].

При идеальной пластичности, когда  $f_0(\sigma_{ij}, d_m) = 0$  и  $d'f \leq 0$ , пластические деформации возникают только при нейтральном нагружении или при неподвижном векторе напряжений, который касается поверхности текучести. В этом случае из неравенства (32) можно определить или только ограничить направление вектора приращения пластических деформаций. Его величина, как следует из (36) и (37), оказывается неопределенной. Поэтому в идеальной пластичности удобнее работать не с приращениями деформаций, а со скоростями.

Идеально пластические тела способны пластически деформироваться при постоянных напряжениях. Но для них задание процесса нагружения не может определять процесс деформирования. Поэтому представляет интерес определения идеально пластических тел на основе задания функции деформирования [2].

Рассмотрим в качестве функции нагружения условие Кулона-Мора, которое широко используется для грунтовых сред. В главных напряжениях оно имеет следующий вид:

$$\sigma_1 - \chi \sigma_2 - \sigma_p = 0, \quad (46)$$

где  $\chi = \sigma_p / \sigma_c$ ;  $\sigma_p$ ,  $\sigma_c$  – предельное состояние материала при растяжении и сжатии.

По этому условию пластическое состояние наступает либо при достижении касательными напряжениями некоторой критической величины, зависящей от нормальных напряжений, действующих по тем же плоскостям скольжения, либо при достижении наибольшими нормальными напряжениями предельного значения. Если воспользоваться преобразованиями от  $\sigma_p, \sigma_c$  к  $\varphi, c$ , которые приведены в [11] и имеют вид

$$\sigma_p = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad \sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \chi = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (47)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения,  $c$  – сцепление, то используя формулу (21), после преобразований из (46) получаем соотношение

$$\left( \sigma_0 - \frac{\bar{\sigma} \sin \psi}{\sqrt{3}} \right) \sin \varphi + \bar{\sigma} \cos \psi - c \cos \varphi = 0, \quad (48)$$

которое часто используется в механике грунтов.

При выполнении равенства  $\sigma_T = \sigma_p = \sigma_c$ , из (46) находим

$$\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_T = 0, \quad (49)$$

а из (48) соответственно получаем

$$2 \bar{\sigma} \cos \psi - \sigma_T = 0. \quad (50)$$

Это соотношение определяет условие Треска-Сен-Венана, которое часто применяется к металлам, сплавам и связанным грунтам, например, глинам.

Соотношения (46) и (48) представляют функции текучести грунтов, которые фиксируют их начальную текучесть и применимы для неупрочняющихся (идеальнопластичных) их представителей. В этом случае величина напряжений  $\sigma_p$  и  $\sigma_c$  не изменяются. Если некоторые грунты при определенных условиях их нагружения удовлетворяют закону изотропного упрочнения, то при неоднократном нагружении и разгрузке величины  $\sigma_p$  и  $\sigma_c$  должны изменяться, или считая их постоянными, необходимо добавить к левым частям уравнений некоторую функцию, учитывающую упрочнение грунтов в процессе их упругопластического деформирования. Полученная таким образом новая функция и будет называться функцией нагружения. В этом простейшем случае функцию упрочнения можно представить в виде

$$h(\chi_i) = H' d\varepsilon^p, \quad (51)$$

$$H' = \frac{d\sigma}{d\varepsilon^p} = \frac{E_T}{1 - E_T/E}, \quad (52)$$

$$d\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \varepsilon_{кс}^p \varepsilon_{кс}^p. \quad (53)$$

При кинематическом упрощении необходимо в уравнении (48) вместо инвариантов  $\sigma_o, \bar{\sigma}, \psi$  подставить инварианты  $\sigma_o^\circ, \bar{\sigma}^\circ, \psi^\circ$ , которые определяются по формулам (41) при замене напряжений  $\sigma_{ks}$  на напряжения  $\sigma_{ks}^\circ$ .

Определим производные от функции нагружения, которые входят в уравнения состояния. Первая производная  $f_{,\sigma_{ks}}$  находится по правилу дифференцирования сложной функции как

$$f_{,\sigma_{ks}} = f_{,\sigma_o} \sigma_{o,\sigma_{ks}} + f_{,\bar{\sigma}} \bar{\sigma}_{,\sigma_{ks}} + f_{,\psi} \psi_{,\sigma_{ks}}. \quad (54)$$

После трудоемких преобразований получаем

$$\begin{aligned} f_{,\sigma_o} &= \sin \varphi, \\ f_{,\bar{\sigma}} &= \left[ (1 + \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} 3\psi) - \frac{\sin \psi}{\sqrt{3}} (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} 3\psi) \right] \cos \psi, \\ f_{,\psi} &= \frac{\sqrt{3} \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi}{2 \sigma^2 \cos \psi}. \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{o,\sigma_{ks}} &= \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, & \bar{\sigma}_{,\sigma_{ks}} &= \frac{1}{2\sigma} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_o \\ \sigma_{22} - \sigma_o \\ \sigma_{33} - \sigma_o \\ 2\sigma_{12} \\ 2\sigma_{23} \\ 2\sigma_{13} \end{Bmatrix}, \\ \psi_{,\sigma_{ks}} &= -3 \begin{Bmatrix} (\sigma_{22} - \sigma_o)(\sigma_{33} - \sigma_o) - \sigma_{23}^2 \\ (\sigma_{11} - \sigma_o)(\sigma_{33} - \sigma_o) - \sigma_{13}^2 \\ (\sigma_{11} - \sigma_o)(\sigma_{22} - \sigma_o) - \sigma_{12}^2 \\ 2[\sigma_{13}\sigma_{23} - (\sigma_{33} - \sigma_o)\sigma_{12}] \\ 2[\sigma_{12}\sigma_{13} - (\sigma_{11} - \sigma_o)\sigma_{23}] \\ 2[\sigma_{12}\sigma_{23} - (\sigma_{22} - \sigma_o)\sigma_{13}] \end{Bmatrix} - \sigma^2 \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (56)$$

В этой формуле производные от инвариантов тензора напряжений будут для всех функций текучести и нагружения равны. Меняются только производные от этих функций по инвариантам тензора напряжений.

При кинематическом упрочнении производную от функции нагружения по переменным  $\sigma_{KS}$  можно записать в виде

$$f_{,\sigma_{KS}} = f_{,\sigma_{KS}^\circ} \sigma_{KS,\sigma_{KS}}^\circ. \quad (57)$$

Применяя формулы (41) и (43), находим

$$f_{,\sigma_{KS}} = f_{,\sigma_{KS}^\circ}. \quad (58)$$

Следовательно, если записать приведенные выше инварианты через  $\sigma_{KS}^\circ$ , то в формулах для производных, которые определяют  $f_{,\sigma_{KS}}$ , необходимо произвести замену  $\sigma_{KS}$  на  $\sigma_{KS}^\circ$ , и преобразованные таким образом эти формулы будут определять  $f_{,\sigma_{KS}^\circ}$ , а на основании (58) и  $f_{,\sigma_{KS}}$ .

Для вязкопластических материалов при кинематическом упрочнении можно в качестве компонент тензора  $\rho_{KS}$  использовать следующее соотношение:

$$\rho_{KS} = a \exp(-t/c) \varepsilon_{KS}^P, \quad (59)$$

где  $t$  – время;  $c = \eta/a$  – время релаксации;  $\eta$  – коэффициент вязкости.

Грунты и некоторые другие среды обладают при пластическом деформировании сжимаемостью не только от формоизменения, но и от всестороннего сжатия. В этом случае можно допустить, что в пластическом состоянии определена дополнительная связь между первыми инвариантами тензора напряжений  $\sigma$  и тензора пластической деформации  $\varepsilon^P$  в виде

$$\varepsilon_\circ^P = f_\circ(\sigma_\circ). \quad (60)$$

Дифференциал этого соотношения равен

$$d\varepsilon_\circ^P = f_{\circ,\sigma_\circ} d\sigma_\circ. \quad (61)$$

Определенный таким образом новый закон пластического течения от всестороннего сжатия является независимым от закона (28). Его можно рассматривать как ассоциированный с функцией нагружения

$$f_1 = f_\circ - \varepsilon_\circ^P = 0. \quad (62)$$

Соотношение (62) геометрически представляет собой поверхность в виде крышечки, ограничивающей неограниченную область, представ-

ляемую условием (48). Поверхности  $f = 0$  и  $f_i = 0$  будут ограничивать область упругого состояния среды, как представлено на рисунке 6, и в каждой, лежащей на одной из них точке, включая области пересечения, имеет место соотношение

$$d\varepsilon_{\circ}^p = f_{\sigma_{\circ}} \sigma_{\circ, \sigma_{\circ}} + f_{\sigma_{\circ}} d\sigma_{\circ}. \quad (63)$$

Некоторые из функций  $f_{\circ}(\sigma_{\circ})$  приведены в [12]. Например, С.С. Григорян для грунтов предложил следующее соотношение:

$$e_{\circ}^p = \varepsilon_s [1 - \exp(-v\sigma_{\circ})], \quad (64)$$

из которого можно определить

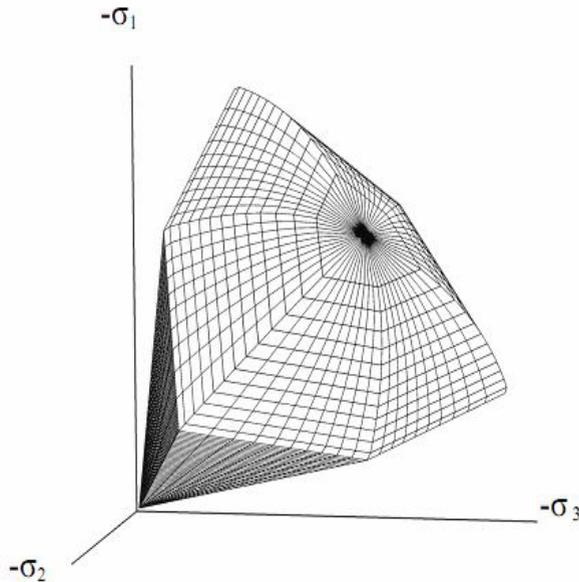
$$d\varepsilon_{\circ}^p = v\varepsilon_s \exp(-v\sigma_{\circ}) d\sigma_{\circ}. \quad (65)$$

Для дробно-линейной зависимости

$$\varepsilon_{\circ}^p = \frac{\sigma_{\circ} \varepsilon_s}{\sigma_{\circ} + K_{\circ} \varepsilon_s} \quad (66)$$

получаем

$$d\varepsilon_{\circ}^p = \frac{K_{\circ} \varepsilon_s^2}{(\sigma_{\circ} + K_{\circ} \varepsilon_s)^2} d\sigma_{\circ}. \quad (67)$$



*Рис. 6. Графическое изображение условия Кулона-Мора с учетом всестороннего сжатия при  $c = 0$*

Здесь  $\varepsilon_s$  – предельное значение объемной деформации при  $\sigma_o \rightarrow \infty$ , т.е., когда материал приобретает предельную плотность;

$K_o$  – модуль объемного деформирования.

Пусть для некоторой материальной частицы среды определено напряжено-деформированное состояние, которое соответствует некоторой точке А на поверхности нагружения  $f = 0$ . В этом случае происходит разрыхление среды, при котором давление  $\sigma_o$ , определяемое функцией  $f_o(\sigma_o)$ , уменьшается. В связи с этим, поверхность нагружения  $f_i = 0$  начинает перемещаться в направлении точки А. При ее достижении следует определять пластическое деформирование с учетом всестороннего сжатия и формоизменения. В этом состоянии дальнейшее разрыхление материала происходить не может, так как оно привело бы к снижению сопротивления среды объемному давлению, что невозможно, так как для точки А  $\sigma_o = const$ . Поэтому приращение пластической объемной деформации в данном положении функций нагружения  $f$  и  $f_i$ , будет равно нулю и, следовательно,  $\varepsilon_o^p = const$ . При нагружении происходит следующая дилатансионная зависимость между  $\varepsilon_o$  и  $\bar{\varepsilon}$ . С увеличением  $\bar{\varepsilon}$  увеличивается  $\varepsilon_o$  до значения пока  $f$  и  $f_i$  не пересекутся в точке А. При дальнейшем увеличении  $\bar{\varepsilon}$ , величина  $\varepsilon_o$  остается постоянной. В момент пересечения  $f$  и  $f_i$ , в точке А вектор приращения пластической деформации не ортогонален поверхности нагружения  $f = 0$ .

В настоящее время в общей постановке отсутствуют доказательства существования и единственности решения упругопластических задач. Некоторые частные теоремы единственности решения и экстремальные принципы в теории пластического течения приведены в [6, 7]. Например, для идеально пластического грунта распределение скоростей деформации не обязательно единственно. Напряженное состояние грунта единственно, если задана вся история его нагружения, начиная от естественного состояния и кончая конечными значениями действующей нагрузки и перемещений, или при заданном распределении в грунте пластических деформаций.

Итак, для склонов из трех этапов математического моделирования был рассмотрен только первый: модель. Остальные два этапа: алгоритм и программа будут исследованы в следующей статье.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гришин В.А., Дорофеев В.С. *Некоторые модели грунтовой среды.* – Одесса: Внешрекламсервис, 2007. – 310 с.
2. Болдырев Г.Г. *Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса.* – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.

3. *Введение в математическое моделирование: Учебн. пособие / Под ред. П.В.Трусова. – М.: Логос, 2005. – 440 с.*
4. *Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.*
5. *Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.*
6. *Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И. Теория упрочняющегося пластического тела. – М.: Наука, 1971. – 232 с.*
7. *Койтер В. Т. Общие теоремы теории упругопластических сред. – М.: Изд. иностр. лит., 1981. – 80 с.*
8. *Зарецкий Ю. К. Лекции по современной механике грунтов. – Ростов: Изд. Ростовского университета, 1989. – 608 с.*
9. *Прагер В. Проблемы теории пластичности. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 136 с.*
10. *Новожилов В. В., Кадашевич Ю. И. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.*
11. *Флорин В.А. Основы механики грунтов. –Т. 1. – Л.-М.: Стройиздат, 1959. – 357 с.*
12. *Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 311 с.*

*Стаття надійшла до редакції 12.11.2013*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, генеральний директор  
Морського інженерного бюро **Г.В. Єгоров**

доктор технічних наук, професор, науковий консультант  
Морського інженерного бюро **В.В. Козляков**

УДК 69.05:658.-62:728.1

В.А. Гришин, А.В. Гришин

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКЛОНОВ (2)

*Рассматривается применение математического моделирования к проблеме нелинейного деформирования склонов.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, напряжения, деформации, склоны, пластичность, оползни, алгоритм, программа.

*Розглядається застосування математичного моделювання до проблеми нелінійного деформування схилів.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, напруги, деформації, схили, пластичність, зсуви, алгоритм, програма.

*Application of mathematical modelling to a problem of nonlinear deformation of slopes is considered.*

**Keywords:** mathematical modelling, pressure, deformations, slopes, plastic properties, landslips, algorithm, the program

*Современные электронные вычислительные машины дали в руки исследователей эффективное средство для математического моделирования сложных задач науки и техники. Именно поэтому количественные методы исследования в настоящее время проникают практически во все сферы человеческой деятельности, а математические модели становятся средством познания.*

**Г.И. Марчук <<Методы вычислительной математики>>**



Данная статья является продолжением работы [1], в которой исследован первый этап математического моделирования склонов: модель и приведены основные уравнения. Здесь будут разработаны оставшиеся два этапа: алгоритм – программа и введено понятие обобщенного решения. Одним из основных его преимуществ является понижение порядка производных, входящих в исходные уравнения, что позволяет расширить класс функций, в котором определяется решение. Это вызвано, например, реальным представлением действующей нагрузки и механических параметров грунтов склона в виде разрывных функций.

При решении упругопластических задач численными методами необходимо реализовать две проблемы: 1) дискретизацию области, занимаемой склоном, и исходных уравнений; 2) построение итерационного процесса для определения искомым функций, характеризующих напряженно-деформированное состояние склона, с наперед заданной точностью.

Решение первой проблемы позволяет представить рассматриваемую задачу в алгебраической форме, т.е. перейти от бесконечного числа степеней свободы склона к конечному числу. Ее можно реализовать, используя различные проекционные методы, например, методом взвешенных невязок. Решение второй проблемы дает возможность произвести линеаризацию исходных нелинейных уравнений. При этом, операцию по корректировке их коэффициентов можно выполнять на каждой итерации решения (метод переменных параметров упругости, метод касательной жидкости) или только на первой итерации, или через их заданное количество (модификации метода Ньютона-Канторовича, к которым относится метод упругих решений и метод начальных напряжений). Обзоры по этим методам решения содержатся в многих работах, например, [2, 3, 4, 5, 6].

Для дискретизации уравнений и области склона здесь будет использоваться метод конечных элементов (МКЭ). Его достоинства и недостатки подробно изложены в многочисленных работах [2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Одно из основных преимуществ этого метода состоит в том, что он позволяет использовать функции, аппроксимирующие обобщенное решение, с областью определения в пределах каждого конечного элемента, а также дает возможность получать матрицу жесткости симметричной и ленточной, что делает метод очень эффективным с точки зрения затрат времени счета. Таким преимуществом не обладают в классической постановке методы Бубнова-Галеркина и вариационные. Далее, метод конечных элементов позволяет также сравнительно просто аппроксимировать граничные условия, что вызывает серьезные затруднения в конечно-разностных и вариационно-разностных методах. К другим преимуществам МКЭ относятся его простота, универсальность и ясность физической интерпретации.

Ограничиваем склон конечной областью, на границе которой принимаем перемещения равными нулю. В этой области, например, при плоской деформации ее аппроксимация выполнялась изопараметрическими

четырёхугольниками с 4-мя, 8-ю и 9-ю узлами. Они показаны на рис. 1. При такой дискретизации искомые величины определяются в узлах элементов. Их значения в других точках области склона вычисляются с использованием функций формы, вид которых зависит от типа элементов. Функции формы в локальной системе координат  $\eta_i$ , в которой выполняется неравенство  $1 \leq \eta_i \leq 1, i = 1, 2$ , для восьмиузловых элементов имеют следующий вид:

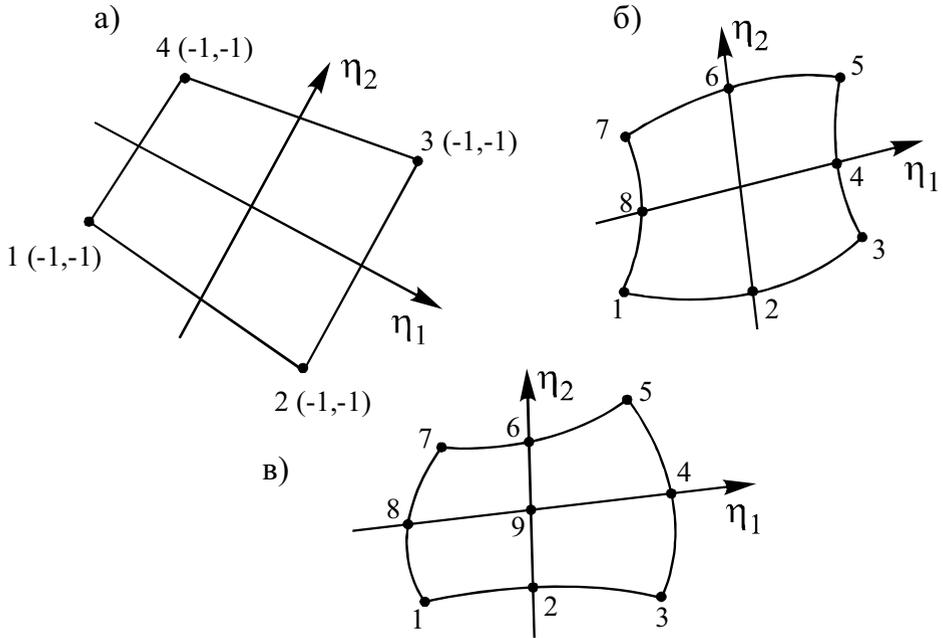


Рис. 1. Плоские конечные элементы

$$\begin{aligned}
 N_{(e)}^m(\eta) &= \frac{1}{4}(1 + \eta_1 \eta_1^m)(1 + \eta_2 \eta_2^m)(\eta_1 \eta_1^m + \eta_2 \eta_2^m - 1), \quad m = 1, 3, 5, 7; \\
 N_{(e)}^m(\eta) &= \frac{1}{2}(\eta_1^m)^2(1 + \eta_1 \eta_1^m)(1 - \eta_2^2) - \frac{1}{2}(\eta_2^m)^2(1 + \eta_2 \eta_2^m) \cdot (1 - \eta_1^2), \quad m = 2, 4, 6, 8.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Каждой совокупности локальных координат  $\eta_i, i = 1, 2$  в соотношениях (1) сопоставляется одна и только одна совокупность глобальных координат его узлов по формуле

$$x_{\kappa(e)} = x_{\kappa(e)}^m N_{(e)}^m(\eta), \quad \kappa = 1, 2; \quad m = 1, 2, \dots, m_e, \tag{2}$$

где  $x_{\kappa(e)}$  – глобальные координаты узлов элемента  $r_{(e)}$ .

Используя правило дифференцирования сложных функций, можно установить связь между производными от функции формы по координатам  $x_\kappa$  и производными от  $x_\kappa$  по координатам  $\eta_s$  в виде

$$N_{(e),\eta_\kappa}^m = N_{(e),x_s}^m x_{s,\eta_\kappa}, \quad \kappa, s = 1, 2. \quad (3)$$

Матрица Якоби и обратная ей матрица определяются по формулам

$$\mathbf{J}_{(e)} = \begin{bmatrix} x_{s,\eta_\kappa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{(e)}^m & \eta_\kappa & x_s^m \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$[\mathbf{J}_{(e)}]^{-1} = [\eta_{s,x_\kappa}] \quad (5)$$

где обозначено

$$x_{s,\eta_\kappa} = \frac{\partial x_s}{\partial \eta_\kappa}, \quad \eta_{s,x_\kappa} = \frac{\partial \eta_s}{\partial x_\kappa}, \quad (6)$$

$$N_{(e),\eta_\kappa}^m = \frac{\partial N_{(e)}^m}{\partial \eta_\kappa}, \quad N_{(e),x_\kappa}^m = \frac{\partial N_{(e)}^m}{\partial x_\kappa}.$$

Производные от функции формы  $\mathbf{N}_{(e)}^m(\boldsymbol{\eta})$  по глобальным координатам  $x_\kappa$  вычисляются как

$$N_{(e),x_\kappa}^m = N_{(e),\eta_s}^m \eta_{s,x_\kappa} = N_{(e),\eta_s}^m [\mathbf{J}_{(e)}]^{-1}. \quad (7)$$

В области склона, которую необходимо представить в виде связанных конечных элементов, фиксируем некоторое конечное число точек, равное  $M$ . Их обозначаем как  $\mathbf{x}^\Delta$  ( $\Delta=1, 2, \dots, M$ ) и называем глобальными узлами. Затем, по этим узлам строим конечные элементы, количество которых будет равно  $M_e$ . В каждый элемент входит  $m_e$  глобальных узлов, которые обозначим как  $\mathbf{x}_{(e)}^\kappa$ ,  $\kappa=1, 2, \dots, m_e$  и называем локальными узлами элемента. Вводим отображение

$$\mathbf{x}^\Delta = \mathbf{\Lambda}_{\Delta}^{(e)\kappa} \mathbf{x}_{(e)}^\kappa, \quad \kappa=1, 2, \dots, m_e, \quad (8)$$

которое вкладывает некоторый конечный элемент в область, занимаемую склоном.

При этом,  $\Lambda_{\Delta}^{\kappa(e)} = 1$ , если глобальный узел тела совпадает с локальным узлом  $\kappa$  элемента  $r_{(e)}$ , и  $\Lambda_{\Delta}^{\kappa(e)} = 0$  в противном случае. Совокупность отображений  $\Lambda = \left\{ \Lambda^{(1)}, \Lambda^{(2)}, \dots, \Lambda^{M_e} \right\}$  связывает  $M_e$  элементов в дискретную модель тела, которую обозначаем через  $\overset{\circ}{V}_e$ . Необходимым и достаточным условием существования совокупности отображений  $\Lambda_{\Delta}^m$ , которые обеспечивают возможность подгонять элементы друг к другу таким образом, чтобы они образовали область  $\overset{\circ}{V}_e$ , является условия совместности, приведенное в работах [6, 8].

Обратная совокупность отображений  $\Omega = \left\{ \Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, \dots, \Omega^{M_e} \right\}$  осуществляет разбиение области  $\overset{\circ}{V}_e$  на конечные элементы. Для элемента  $r_{(e)}$

$$\mathbf{x} = \Omega_{\Delta}^{\kappa(e)} \mathbf{x}^{\Delta}, \quad \kappa = 1, 2, \dots, m_e, \quad (9)$$

где  $\Omega_{\Delta}^{\kappa(e)} = 1$ , если узел  $\kappa$  элемента  $r_{(e)}$  совпадает с узлом  $\Delta$  области  $\overset{\circ}{V}_e$  и  $\Omega_{\Delta}^{\kappa(e)} = 0$  – в противном случае.

Вектор-функция приращения перемещения  $d\mathbf{u}(\mathbf{x})$  в глобальном узле  $\mathbf{x}^{\Delta}$  обозначим через  $d\mathbf{u}^{\Delta} = d\mathbf{u}(\mathbf{x}^{\Delta})$ . Величину  $d\mathbf{u}^{\Delta}$  называем глобальными значениями  $d\mathbf{u}(\mathbf{x})$  в узлах области  $\overset{\circ}{V}_e$ .

Каждый конечный элемент  $r_{(e)}$  считается областью определения некоторой локальной вектор-функции  $d\mathbf{u}_{(e)}$  того же класса, что и  $d\mathbf{u}$ . Значения  $d\mathbf{u}_{(e)}$  в локальном узле  $\mathbf{x}_{(e)}^{\kappa}$  элемента  $r_{(e)}$  обозначаем через  $d\delta_{(e)}^{\kappa}$ ,  $\kappa = 1, 2, \dots, m_e$  и называем локальным значением функции  $d\mathbf{u}_{(e)}$  в элементе  $r_{(e)}$ .

Аппроксимируем  $d\mathbf{u}_{(e)}$  на элементе  $r_{(e)}$  непрерывными функциями, линейно зависящими от  $d\delta_{(e)}^{\kappa}$ , в виде

$$d\mathbf{u}_{(e)} = N_{(e)}^{\kappa} d\delta_{(e)}^{\kappa}, \quad d\mathbf{u}_{(e)} = (d\mathbf{u}_1, d\mathbf{u}_2)^T, \quad (10)$$

где функции формы  $N_e$  в узлах элемента  $\mathbf{x}_{(e)}^{\kappa}$  удовлетворяют условию

$$N_{(e)}^n(\mathbf{x}_{(e)}^{\kappa}) = \delta_{\kappa n}, \quad n, \kappa = 1, 2, \dots, m_e. \quad (11)$$

где  $\delta_{\kappa n}$  – символ Кронекера.

Конечно-элементная модель вектор-функции  $d\mathbf{u}(\mathbf{x})$  определяется путем связывания всех узлов конечных элементов соотношениями (8), отображающими множество локальных значений  $d\delta_{(e)}^{\kappa}$  в множество глобальных значений  $d\delta^{\Delta}$

$$d\delta^{\Delta} = \Lambda_{\Delta}^{\kappa} d\delta_{(e)}^{\kappa}, \quad \kappa = 1, 2, \dots, m_e. \quad (12)$$

Дискретная модель вектор-функции  $d\mathbf{u}(\mathbf{x})$  определяется в виде соотношения

$$d\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{e=1}^{M_e} d\mathbf{u}_{(e)} = \sum_{e=1}^{M_e} N_{(e)}^{\kappa} \Omega_{\Delta}^{\kappa} d\delta^{\Delta} = \mathbf{N}^{\Delta} d\delta^{\Delta}, \quad (13)$$

где после второго знака равенства производится суммирование по  $\Delta$  от 1 до  $M$ .

В этом случае получаем

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}^{\Delta} \delta^{\Delta}. \quad (14)$$

Здесь  $\delta^{\Delta}$ ,  $\Delta = 1, 2, \dots, M$  глобальное значение  $\mathbf{u}$  в узле  $\Delta$ .  
Таким же образом находим

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}^{\Delta} \delta^{\Delta}, \quad d\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}^{\Delta} d\delta^{\Delta}, \quad (15)$$

где матрица  $\mathbf{B}^{\Delta}$  для плоских задач имеет вид

$$\mathbf{B}^\Delta = \begin{vmatrix} N_{,x_1}^\Delta & 0 \\ 0 & N_{,x_2}^\Delta \\ N_{,x_2}^\Delta & N_{,x_1}^\Delta \end{vmatrix}, \quad N_{,x_\kappa}^\Delta = \frac{\partial N^\Delta}{\partial x_\kappa}; \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}]^T, \quad d\boldsymbol{\varepsilon} = [d\varepsilon_{11}, d\varepsilon_{22}, d\varepsilon_{12}]^T, \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad \boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}]^T.$$

Здесь  $\mathbf{D} = \mathbf{D}^e$  для упругих областей,  $\mathbf{D} = \mathbf{D}^{ep}$  для упругопластических областей и  $\mathbf{D} = \mathbf{D}^{vp}$  для упруговязкопластических областей склона.

Уравнения виртуальной работы в полных напряжениях записываются в матричной форме как

$$\left\{ [\mathbf{d}\delta^\Delta]^T \left[ \int_{\mathring{V}} [\mathbf{B}^\Delta]^T \boldsymbol{\sigma} d\mathring{V} - \int_{\mathring{V}} [\mathbf{N}^\Delta]^T \mathring{F} d\mathring{V} - \int_{s_1} [\mathbf{N}^\Delta]^T \mathbf{q} d\mathring{S} \right] \right\} = 0. \quad (18)$$

В дальнейшем приведенные ниже операции выполняются на уровне одного элемента, а затем производится суммирование результатов по элементам всей области тела. Первое слагаемое в фигурных скобках

(18) применительно к конечному элементу  $V_{(e)}$  преобразуется к виду

$$\sigma_{(e)}^{ks} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [\mathbf{B}_{(e)}^\kappa]^T D_{(e)} B_{(e)}^s \mathbf{h}_{(e)} \det \mathbf{J}_{(e)} d\eta_1 d\eta_2 =$$

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sigma_{(e)}^{ks} d\eta_1 d\eta_2, \quad \kappa, s = 1, 2, \dots, m_e. \quad (19)$$

Второе слагаемое принимает следующий вид:

$$\mathbf{F}_{(e)}^\kappa = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [\mathbf{N}_{(e)}^\kappa]^T \mathring{F}_{(e)} \mathbf{h}_{(e)} \det \mathbf{J}_{(e)} d\eta_1 d\eta_2 =$$

$$= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{f}_{(e)}^\kappa d\eta_1 d\eta_2, \quad \kappa = 1, 2, \dots, m_e. \quad (20)$$

Обычно в качестве  $\mathring{F}$  в расчетах принимается собственный вес тела. В этом случае (20) можно записать как

$$\mathring{F}_{x_1(e)}^\kappa = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N_{(e)}^\kappa]^m \rho_{(e)} \mathbf{g} \sin \Theta \det \mathbf{J}_{(e)} d\eta_1 d\eta_2,$$

$$\mathring{F}_{x_2(e)}^\kappa = - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N_{(e)}^\kappa]^m \rho_{(e)} \mathbf{g} \cos \Theta \det \mathbf{J}_{(e)} d\eta_1 d\eta_2, \quad (21)$$

где  $\rho_{(e)}$  – плотность массы материала элемента;  $\mathbf{g}$  – ускорение силы тяжести;  $\Theta$  – угол между осью  $x_1$  и направлением гравитационной силы.

Если конечный элемент в процессе деформирования тела переходит в упругопластическое состояние, то матрица  $\mathbf{D}_{(e)}$  заменяется на  $\mathbf{D}^{ep}$ . В упруговязкопластическое состояние производится замена  $\mathbf{D}_{(e)}$  на  $\mathbf{D}^{vp}$ . В упругом состоянии эта матрица равна  $\mathbf{D}^e$ .

Точное вычисление полученных выше сложных интегралов удается выполнить очень редко, поэтому эти операции производятся численными методами обычно по Гауссу [6] как

$$\begin{aligned}\sigma_{(e)}^{KS} &= \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^n \sigma_{(e)}^{KS}(\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2) H_m H_l, \\ F_{(e)}^K &= \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^n f_{(e)}^K(\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2) H_m H_l,\end{aligned}\tag{22}$$

где  $\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2$  – координаты точек интегрирования, их количество на элементе  $V_{(e)}$  равно  $n$ ;

$H_m, H_l$  – весовые коэффициенты. Эти значения берутся из таблиц [6].

Формулы численного интегрирования (21) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{F}_{x_1(e)}^K &= \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^n \rho_{(e)} \mathbf{g} h_{(e)} \sin \Theta N_{(e)}^K(\bar{\eta}_1^m, \bar{\eta}_2^m) \det \mathbf{J} H_m H_l, \\ \dot{F}_{x_2(e)}^K &= \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^n \rho_{(e)} \mathbf{g} h_{(e)} \cos \Theta N_{(e)}^K(\bar{\eta}_1^m, \bar{\eta}_2^m) \det \mathbf{J} H_m H_l.\end{aligned}\tag{23}$$

Рассмотрим третье слагаемое в фигурных скобках (18), которое содержит поверхностные усилия  $\mathring{\mathbf{q}} = [q_n, q_t]^T$ . Здесь  $q_n$  – нормальная составляющая к поверхности  $\mathring{S}_l$  усилия  $\mathring{\mathbf{q}}$ , а  $q_t$  – его касательная составляющая. Они определяются по формулам

$$\begin{aligned}\mathring{q}_{x_1(e)}^K &= \int_{\mathring{S}_{l(e)}} N_{(e)}^K(q_t x_{1,\eta_1} - q_n x_{2,\eta_2}) d\eta_1, \\ \mathring{q}_{x_2(e)}^K &= \int_{\mathring{S}_{l(e)}} N_{(e)}^K(q_n x_{1,\eta_1} + q_t x_{2,\eta_2}) d\eta_1.\end{aligned}\tag{24}$$

Из (18) следует, что в процессе деформирования выражение, стоящее в фигурных скобках, равно нулю, так как возможные узловые пере-

мещения  $d\delta^\Delta$  принимаются отличным от нуля. При численном приближенном решении и при вычислениях на ЭВМ с определенной точностью равенства нулю этого выражения не получается, т.е.

$$\omega = \int_{\dot{V}} [B^\Delta]^\top \sigma d\dot{V} - \int_{\dot{V}} [N^\Delta]^\top \overset{\circ}{F} d\dot{V} - \int_{s_1} [N^\Delta]^\top \overset{\circ}{q} d\overset{\circ}{S} \neq 0, \quad (25)$$

где  $\omega$  – вектор остаточной (резидуальной) силы.

Если задача решается в приращениях, то на каждом шаге приращения также возникает остаточная сила, равная

$$\Delta\omega = \int_{\dot{V}} [B^\Delta]^\top \Delta\sigma d\dot{V} - \int_{\dot{V}} [N^\Delta]^\top \Delta \overset{\circ}{F} d\dot{V} - \int_{s_1} [N^\Delta]^\top \Delta \overset{\circ}{q} d\overset{\circ}{S} \neq 0. \quad (26)$$

Поэтому в процессе численного решения задач предусматривается процедура для уменьшения  $\omega$  до наперед заданной малой величины.

При приближенном методе решения задачи вследствие накопления различных ошибок возможен выход вектора напряжений  $\sigma$  за пределы поверхности, определенной функцией нагружения, т.е.  $f > \theta$ . Такая ситуация недопустима в теории пластического течения. В процессе решения предусмотрена процедура возвращения вектора на поверхность нагружения или внутрь области, ограниченной этой поверхностью. Она выполняется по следующему алгоритму.

1. Определяется на  $i$ -й итерации вектор приращения узловых перемещений  $d\delta^i$ , затем по формуле (14) находится вектор  $du^i$  и по формуле (15) вектор  $d\varepsilon^i$  от действия остаточной силы  $\omega^{i-1}$ , полученной на  $i - 1$  итерации.

2. Вычисляются

$$d\sigma^{ei} = Dd\varepsilon^i, \quad \sigma^i = \sigma^{i-1} + d\sigma^{ei}. \quad (27)$$

3. Делается проверка: выходит ли вектор  $\sigma^{ei}$  за область, ограниченную поверхностью нагружения. Обозначим эту область через  $G$ , а ее границу через  $\partial G$ . Возможны два случая:

а) до  $i$ -й итерации конец вектора  $\sigma^{i-1}$  находился на поверхности  $\partial G$ ;

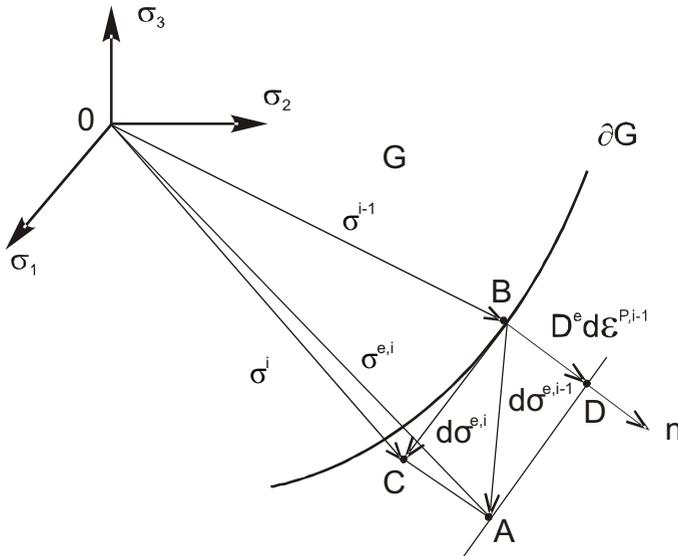
в) до  $i$ -й итерации конец вектора  $\sigma^{i-1}$  находился внутри области  $G$ .

Исследуем случай А. Здесь возможны три варианта:

1) выполняется процесс разгрузки, следовательно, никакой корректировки напряжений  $\sigma^{ei}$  делать не надо;

2) выполняется процесс нейтрального нагружения, следовательно, и здесь также не надо корректировать вектор напряжений  $\sigma^{ei}$ ;

3) функция нагружения  $f > 0$  и конец вектора напряжений  $\sigma^{ei}$  выходит за область  $G \cup \partial G$ . Такая ситуация изображена на рис. 2. Требуется корректировка вектора  $\sigma^{ei}$ .



*Рис. 2. Возвращение вектора  $\sigma^{ei}$  при условиях:  
 $f > 0$ , конец вектора  $\sigma^{i-1}$  лежит на поверхности  $\partial G$*

Из точки В проводим нормаль  $n$  к поверхности нагружения  $\partial G$ , на которой лежит вектор приращений пластической деформации  $d\epsilon^{i-1}$ . На основании постулата суммирования деформации определяем

$$d\epsilon^{i-1} = d\epsilon^{e,i-1} + d\epsilon^{p,i-1} = (D^e)^{-1} d\sigma^{i-1} + d\epsilon^{p,i-1}, \quad (28)$$

где  $D^e$  – матрица модулей упругости.

Умножая левую и правую части соотношения (28) на  $D^e$ , получаем

$$D^e d\epsilon^{i-1} = d\sigma^{i-1} + D^e d\epsilon^{p,i-1}. \quad (29)$$

Следовательно, для преобразования вектора напряжений  $\sigma^{e,i}$  в вектор  $\sigma^i$  необходимо определить  $D^e d\varepsilon^{p,i-1}$  и вычесть это выражение из  $\sigma^{e,i}$ . При численной реализации на ЭВМ все эти операции выполняются в компонентной форме.

Исследуем случай В. На  $i$ -й итерации возможны два варианта:

1) функция нагружения  $f > 0$  и конец вектора напряжений  $\sigma^{e,i}$  находится внутри области  $G$ , что соответствует упругому состоянию материала. Коррекция вектора  $\sigma^{e,i}$  не производится.

2) функция нагружения  $f > 0$  и конец вектора напряжений  $\sigma^{e,i}$  выходит за область  $G \cup \partial G$ . Эта ситуация изображена на рис. 3.

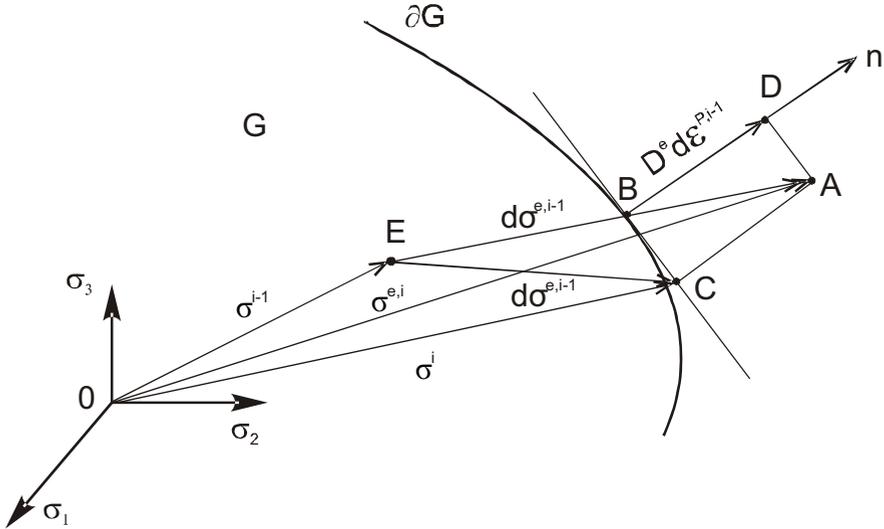


Рис. 3. Возвращение вектора  $\sigma^i$  при условиях:  
 $f > 0$ , конец вектора  $\sigma^{e,i-1}$  лежит внутри  $G$

Аналогично предыдущему случаю, находим

$$d\sigma^{e,i-1} = D^e d\varepsilon^{i-1} - D^e d\varepsilon^{p,i-1}. \quad (30)$$

Из рис. 3 следует, что для преобразования вектора напряжений  $\sigma^{e,i}$  в вектор  $\sigma^i$ , который будет удовлетворять условию  $f = 0$ , необходимо определить на  $i$ -й итерации вектор  $D^e d\varepsilon^{p,i-1}$  и вычесть его из вектора  $\sigma^{e,i}$ , т.е.

$$\sigma^i = \sigma^{e,i} - D^e d\varepsilon^{p,i-1}. \quad (31)$$

Приведенный выше анализ показывает для случая А (варианты 1 и 2) и для случая В (вариант 1) корректировку вектора  $d\sigma^{e,i-1}$  на  $i$ -й итерации производить не требуется. Напряжения должны определяться по формуле

$$\sigma^i = \sigma^{i-1} - d\sigma^{e,i-1}. \quad (32)$$

Для случая А (вариант 3) и для случая В (вариант 2) необходима корректировка  $d\sigma^{e,i-1}$ . Напряжение  $\sigma^i$  должно определяться по формуле (30). При корректировке вектора  $d\sigma^{e,i-1}$  формула (31), которая определяет вектор напряжений  $\sigma^i$ , преобразуется к виду

$$\sigma^i = \sigma^{i-1} + d\sigma^{e,i-1} - D^e d\varepsilon^{p,i-1}. \quad (33)$$

4. В зависимости от приведенных выше условий, необходимо определять  $\sigma^i$  по формуле (32) или (33). Найденное значение  $\sigma^i$  используется для вычисления вектора остаточной силы  $\omega$ .

Применяя отображение  $\Lambda$  к (18), (19) или (21) и обозначая через  $Q$  объединение подматриц массовых и поверхностных сил в глобальную матрицу узловых нагрузок, получаем следующее уравнение:

$$K(\delta)\delta - Q = 0. \quad (34)$$

Оно является аналогом выражения в фигурных скобках (2.25), приравненного нулю. В (34)  $K(\delta)$  называется матрицей жесткости системы, которая зависит через матрицу  $D$  от вектора глобальных узловых перемещений  $\delta$ .

Как уже отмечалось выше, численное решение рассматриваемых упругопластических задач находится в приращениях. Для этого действующая нагрузка  $Q$  разбивается на  $N$  малых интервалов  $\Delta Q_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  и затем определяется вектор узловых приращений перемещений  $\Delta\delta_i$  из уравнения

$$K(\delta_i)\Delta\delta_i - \Delta Q_i = 0. \quad (35)$$

Далее по приведенным выше формулам находится  $\Delta\varepsilon_i$  и  $\Delta\sigma_i$ .

Разберем процесс решения подробнее. На первом приближении от действующей нагрузки  $\Delta Q_1$  из решения уравнения (35) получены  $\delta_1 = \Delta\delta_1$ ,  $\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_1$ ,  $\sigma_1 = \Delta\sigma_1$ . Соответственно, после  $i$ -го приближения определены

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_{i-1} + \Delta Q_{i-1}, \quad \delta_i = \delta_{i-1} + \Delta\delta_{i-1}, \\ \varepsilon_i &= \varepsilon_{i-1} + \Delta\varepsilon_{i-1}, \quad \sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma_{i-1}. \end{aligned}$$

Вследствие приближенного решения уравнения (35) и приближенных вычислений образовалась невязка в виде остаточной силы

$$K(\delta_{i-1})\Delta\delta_{i-1} - \Delta Q_{i-1} = \omega(\delta_{i-1}). \quad (36)$$

Следовательно, она также фигурирует и в уравнении (34)

$$\omega(\delta_{i-1}) = K(\delta_{i-1})\delta_{i-1} - Q_{i-1}. \quad (37)$$

Подставляя (36) в (37), после преобразований находим соотношение

$$K(\delta_{i-1})\delta_i - Q_i = 0 \quad (= \omega(\delta_{i-1})), \quad (38)$$

в котором также вследствие приближенных вычислений в правой части вместо нуля получаем невязку  $\omega(\delta_{i-1})$ .

Видим, что на каждом шаге приближения в уравнении равновесия (34) вследствие приближенного решения (35) и приближенных вычислений образуется невязка, которая также связана с возвращением вектора напряжений внутрь или на границу области, ограниченной поверхностью нагружения. Поэтому в процессе численного решения разработана процедура по уменьшению невязки до наперед заданной малой величины.

Следующая трудность заключается в решении уравнения (35) на каждом этапе приращения нагрузки  $\Delta Q_i$ . Различные одношаговые и многошаговые методы решения таких уравнений изложены в [5]. Уравнение (35), опуская индекс  $i$ , можно записать как

$$K(\delta)\Delta\delta = 0. \quad (39)$$

Итерационный процесс решения уравнения (39) по методу Ньютона-Канторовича можно представить следующим образом:

$$\Delta\delta^j = \Delta\delta^{j-1} - [K(\delta^{j-1})]^{-1} K(\delta^{j-1}), \quad j = 1, 2, \dots \quad (40)$$

Сложность решения уравнения (40) состоит в определении производной от матрицы жесткости системы алгебраических уравнений и затем в ее обращении. Быстрота сходимости зависит от удачного выбора начального приближения. Для упрощения решения применяются различные модификации итерационного процесса (40) [5, 13]. Нами в программный комплекс заложен метод касательных жесткостей и его модификации, когда матрица жесткости при ее обращении вычисляется через заданное количество итераций. Линейная система алгебраических уравнений на каждой итерации решается фронтальным методом [14, 15, 16]. Итерационный процесс заканчивается, если выполняется неравенство

$$\frac{\|\Delta \delta^j - \Delta \delta^{j-1}\|}{\|\delta^j\|} \leq \varepsilon_0, \quad (41)$$

где  $\varepsilon_0$  – наперед заданная малая величина.

Алгоритм решения ориентирован на использование ЭВМ и включает следующие этапы, соответствующие блок схеме программы.

Объявляются глобальные динамические массивы. Затем, вводится с проверкой исходные данные.

1. Объявляются глобальные динамические массивы. Затем, вводится с проверкой исходные данные.

2. Производится автоматизированное с помощью ЭВМ разбиение области, занимаемой системой, на конечные элементы. Далее, определяются границы динамических массивов и объявляются необходимые файлы.

3. Производится разбиение действующей нагрузки и заданных перемещений в области системы на приращения. Выводится на дисплей схема конечных элементов с указанием нумераций ее узлов и элементов. Организуется цикл по этим приращениям.

4. Строится итерационный процесс, который включает в себя операции по уменьшению невязки в уравнении равновесия системы и по возвращению вектора напряжений в область, ограниченную функцией нагружения. На каждой итерации выполняются следующие операции:

а. Определяется количество итераций, через которое корректируется матрица жесткости. Если это требуется на данной итерации, то заново вычисляются элементы матрицы жесткости  $\mathbf{K}(\delta)$ . Для этого вначале определяется вспомогательные матрицы  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{D}$ . До вычисления элементов матрицы  $\mathbf{D}$  делается проверка по конечным элементам о их возможной работе в упругопластической стадии. Если это подтверждается, то вместо матрицы  $\mathbf{D}$  определяется матрица  $\mathbf{D}^{ep}$ . В противном случае вычисляется матрица  $\mathbf{D}^e$ . Производится запись элементов матрицы  $\mathbf{K}(\delta)$  в вспомогательный файл.

b. Из вспомогательного файла вводятся по сегментам элементы матрицы жесткости  $\mathbf{K}(\delta)$  и выполняется решение фронтальным методом.

Определяются  $\Delta\delta$  и  $\delta$ .

c. Вычисляется невязка, вызванная приближенным решением и возвращением вектора напряжений в область, ограниченную функцией нагружения. Производится ее уменьшение до заданной малой величины. Корректируется вектор напряжений с учетом перераспределения пластических зон в теле.

d. Делается проверка неравенства (41). Если оно не выполняется, то процесс решения возвращается на пункт а.

5. Заканчивается цикл по приращениям нагрузки и заданным перемещениям.

6. Производится вывод на дисплей общей схемы перемещения тела, схемы образования в нем пластических зон, а также эпюр перемещений и напряжений по сечениям, интересующим пользователя.

Рассмотрим решение упруговязкопластических задач. В момент времени  $t_n$  уравнение виртуальной работы после дискретизации будет иметь вид (18). При решении задачи в приращениях оно записывается в такой же форме, но полные напряжения и нагрузки заменяются их приращениями. Например, учитывая, что  $[d\delta]^T \neq 0$ , получаем

$$\int_V [B_n^\Delta]^T \Delta\sigma_n d\dot{\mathbf{V}} - \int_V [N_n^\Delta]^T \Delta F_n d\dot{\mathbf{V}} - \int_{s_1} [N_n^\Delta]^T \Delta q_n d\dot{\mathbf{S}} = 0, \quad (42)$$

где индекс  $n$  указывает, что уравнение (42) записано для момента времени  $t_n$ .

Учитывая, что в уравнении (42)  $\Delta\epsilon_n = \mathbf{B} \Delta\delta_n$ , после его преобразований получаем

$$\Delta\delta_n = [\mathbf{K}_n]^{-1} dW_n, \quad (43)$$

$$dW_n = \int_V [B_n]^m D_n^{vp} \epsilon_n^{vp} \Delta t_n d\dot{V} - \Delta Q_n.$$

Приращения вязкопластических деформаций определяется как

$$\Delta\epsilon_n^{vp} = B_n \Delta\delta_n - [D_n^{vp}]^{-1} \Delta\sigma_n. \quad (44)$$

Для упруговязкопластических задач допускается  $f > 0$ , поэтому невязка в уравнении равновесия в момент времени  $t_n$  будет вызвана погрешностями вычислений и погрешностями приближенного метода решения задачи, т.е.

$$\omega_n = \int_{\dot{V}} [B_n^\Delta]^T \sigma_n d\dot{V} - \int_{\dot{V}} [N_n^\Delta]^T F_n d\dot{V} - \int_{s_1} [N_n^\Delta]^T q_n d\dot{S}. \quad (45)$$

Второе соотношение (43) принимает вид

$$dW_n = \int_{\dot{V}} [B_n]^\top D_n^{vp} \varepsilon_n^{vp} \Delta t_n d\dot{V} + \Delta Q_n + \omega_n. \quad (46)$$

Рассмотрим алгоритм решения. Первые три пункта предыдущего алгоритма повторяются без изменения и для решения упруговязкопластических задач. Поэтому начинаем со следующего пункта.

4. Организуется итерационный процесс по времени. На каждом временном шаге выполняются следующие вычисления:

а. Определяется количество итераций, через которые корректируется матрица жесткости. Если необходимо это выполнить на текущей итерации, то заново вычисляются ее элементы и записываются в вспомогательный файл.

б. Из вспомогательного файла вводятся по сегментам элементы матрицы жесткости и выполняется решение фронтальным методом.

Определяется  $\Delta \delta$  и  $\delta$ .

с. Вычисляются

$$\Delta \sigma_n, \sigma_{n+1} = \sigma_n + \Delta \sigma_n, \varepsilon_{n+1}^{vp} = \varepsilon_n^{vp} + \dot{\varepsilon}_n^{vp} \Delta t_n, \Delta t_{n+1}.$$

Определяется невязка  $\omega_n$  по (45) и  $dW_{n+1}$  по (46). При вычислении этих величин учитывается перераспределение пластических зон в теле.

д. Выполняется проверка неравенства

$$\frac{\Delta t_{n+1} \sum \dot{\varepsilon}_{n+1}^{vp}}{\Delta t_l \sum \dot{\varepsilon}_l^{vp}} \leq \varepsilon_0, \quad (47)$$

где суммирование производится по всем точкам Гаусса системы, которые назначаются при численном интегрировании;  $\varepsilon_0$  – заданная малая величина. Если оно не выполняется, то производится возврат на пункт а.

e. Заканчивается итерационный процесс.

f. Производится запись в выходной файл результатов решения для каждого приращения времени.

5. Заканчивается цикл по приращениям нагрузки и заданным перемещениям.

6. Производится вывод на дисплей такой же информации, что и в предыдущем алгоритме. Дополнительно выводятся эпюры развития деформации во времени в заданных пользователем точках тела и время их стабилизации.

Данные алгоритмы для шести различных функций нагружения были реализованы для ЭВМ в системе Delphi и показали высокую эффективность при решении упругих, упругопластических и упруговязкопластических задач. Научная рефлексия полученных результатов по данной работе и конкретные примеры расчета будут приведены в следующей статье. С некоторыми задачами расчета склонов и их анализом можно ознакомиться в работах [17, 18, 19].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гришин В.А, Гришин А.В. Математическое моделирование склонов. Ч.2 // Вісник ОНМУ. – № 38. 2013. – С.41.
2. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч. 1. Упругопластические деформации. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.
4. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах механики. – Запорожье, 2009. – 400 с.
5. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. – М.: Мир, 1975. – 558 с.
6. Zienkiewicz O. C. *The finite element method*. – McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1986. – 787 p.
7. Коннор Дж., Бреббиа К. Метод конечных элементов в механике жидкости. – Л.: Судостроение, 1979. – 263 с.
8. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
10. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
11. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
12. Owen D.R.J., Hinton E. *Finite elements in plasticity: theory and practice* – Pineridge Press Limited Swensea, U.K., 1980. – 594 p.

13. Канторович Л. В., Акилов Г. П. *Функциональный анализ.* – М.: Наука, 1984. – 751 с.
14. Джордж А., Лю Дж. *Численное решение больших разреженных систем.* – М.: Мир, 1988. – 333 с.
15. Писсанецки С. *Технология разреженных матриц.* – М.: Мир, 1988. – 411 с.
16. Irons B. M. *A frontal solution program for finite element analysis // Int. J. Numerical Methods Eng. – Vol. 2. – 1970. – 5-32 p.*
17. Гришин В.А., Дорофеев В.С. *Некоторые нелинейные модели грунтовой среды.* – Одесса: Внешрекламсервис, 2007. – 310 с.
18. Гришин В.А., Снисаренко В.И. *Одесские склоны и оползни.* – К.: МП Леся, 2008. – 300 с.
19. Гришин В.А, Гришин А.В. и др. *Определение напряженно-деформированного состояния склонов и откосов в системе PLAXIS.* – К.: НДІ ПЦЗЕМСПЕЦБУД, 2012. – 218 с.

*Стаття надійшла до редакції 12.11.2013*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, генеральний директор  
Морського інженерного бюро **Г.В. Єгоров**

доктор технічних наук, професор, науковий консультант  
Морського інженерного бюро **В.В. Козляков**

УДК 620.193

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

**ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ  
КОНСТРУКЦИОННОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ НАГРУЖЕНИЯ**

*Разработана методика, изготовлены дополнительные устройства и приспособления, проведены исследования малоциклового выносливости судостроительной корпусной стали типа 15ХН5ДМФ на машине УРС 50/50. Испытания проведены в условиях близких к эксплуатационным на призматических образцах трехточечным изгибом с синусоидальной и трапецидальной формами цикла нагружения. Из результатов испытаний можно заключить, что при синусоидальном цикле трещина зарождается и растет быстрее, чем при трапецидальном.*

**Ключевые слова:** малоцикловая выносливость, форма цикла, судостроительная корпусная сталь.

*Розроблена методика, виготовлені додаткові обладнання і пристрої, виконані дослідження малоциклової витривалості суднобудівної корпусної сталі типу 15ХН5ДМФ на машині УРС 50/50. Досліди проведені в умовах близьких до експлуатаційних на призматичних зразках трьохточковим вигином з синусоїдальною, трапецієдальною формами циклу навантаження. По результатам дослідів можливо зробити висновок, що при синусоїдальному циклі тріщина зароджується і зростає швидше, ніж при трапецієдальному.*

**Ключові слова:** малоциклова витривалість, форма циклу, суднобудівна корпусна сталь.

*Methodology is worked out, additional devices and adaptations are made, studies of low-cycle endurance of shipbuilding cabinet-type steel of type of 15ХН5ДМФ are undertaken on a machine УРС 50/50. Tests are conducted in the conditions of near to an operating on prismatic standards three-point bend with a sinewave and razor the forms of cycle of lading. It is possible to conclude from the results of tests, that at a sinewave cycle a crack is conceived and grows quicker, than at razor.*

**Keywords:** low-cycle endurance, form of cycle, shipbuilding cabinet-type steel.

Количественную оценку сопротивления корпусных сталей малоциклового разрушению весьма удобно проводить на универсальной машине УРС-50/50. Машина позволяет проводить испытания материалов натуральных толщин и элементов конструкций в условиях, приближенных к

эксплуатационным, т.е. в условиях растяжения и изгиба призматических образцов и элементов конструкций с различной формой циклов (синусоидальная, трапецеидальная, прямоугольная, треугольная, пилообразная) при нормальной ( $20 \pm 15/-10^\circ \text{C}$ ) температуре и отсутствии агрессивной среды, при знакопеременном и знакопостоянном приложении осевой или изгибающей нагрузки с любой асимметрией; для испытания на малоцикловую усталость, а также для испытания на растяжение. Путем несложных приспособлений на машине можно проводить испытания в различных жидких агрессивных средах, в том числе в морской воде.

Технические данные машины:

Допускаемая предельная нагрузка	$\pm 500 \text{ кН}$
Предельная статическая нагрузка	$\pm 500 \text{ кН}$
Предельная динамическая нагрузка	$\pm 500 \text{ кН}$
Диапазоны измерения нагрузки	$\pm (20-100) \text{ кН}$ $\pm (40-200) \text{ кН}$ $\pm (100-500) \text{ кН}$
Рабочий ход активного захвата	100 мм
Диапазон частоты циклического нагружения	$4 \cdot 10^{-5} - 50 \text{ Гц}$
Наибольшая амплитуда перемещения активного захвата	50 мм
Наибольшая частота, при которой обеспечивается наибольшая амплитуда перемещения активного захвата (без нагрузки)	0,35 Гц
Наибольшая частота, при которой обеспечивается наибольшая амплитуда динамической нагрузки (жесткость образца $1 \cdot 10^7 \text{ н/см}$ )	10 Гц
Диапазоны измерения деформации для базы тензометра 25 мм	$\pm (0,1-0,5) \text{ мм}$ $\pm (0,21) \text{ мм}$ $\pm (0,5-2,5) \text{ мм}$
то же для базы тензометра 50 мм	$\pm (0,2-1) \text{ мм}$ $\pm (0,4-2) \text{ мм}$ $\pm (1-5) \text{ мм}$
то же для базы тензометра 100 мм	$\pm (0,4-2) \text{ мм}$ $\pm (1-5) \text{ мм}$ $\pm (2-10) \text{ мм}$
Диапазон измерения перемещения активного захвата для малых перемещений:	$\pm (0,2-1) \text{ мм}$ $\pm (0,4-2) \text{ мм}$ $\pm (10-50) \text{ мм}$
то же для больших перемещений:	$\pm (0,2-10) \text{ мм}$ $\pm (0,4-20) \text{ мм}$ $\pm (10-50) \text{ мм}$

Максимальное расстояние между штоками цилиндра и преобразователя силы при испытании на растяжение, включая рабочий ход активного захвата	100 мм
Максимальное расстояние между торцами опор при испытании на сжатие, включая рабочий ход активного захвата	800 мм
Расстояние от оси образца до колонны	300 мм
Наибольшее расстояние между опорами при испытании на изгиб	600 мм
Жесткость рамы машины	$2 \cdot 10^7$ н/см
Жесткость преобразователя силы	$5 \cdot 10^7$ н/см
Счетчик циклов должен обеспечивать счет	0,5; 1,0; 10; 100 ед.
Погрешность измерения статической нагрузки, выраженная оценкой среднего квадратичного отклонения в относительной форме (СКО), начиная с 0,04 наибольшего предельного значения	±1 %.
Погрешность измерения динамической нагрузки (СКО) в пределах от 0,2 до 1,0 каждого диапазона измерения при частоте от $4 \cdot 10^{-5}$ Гц	
до 0,5 Гц	±2 %
от 0,5 Гц до 50 Гц	±3 %
Погрешность поддержания динамической нагрузки не менее 20 мин.	± 6 % от измеряемой величины
Наибольшая частота, при которой обеспечивается нагружение при прямоугольном, треугольном и пилообразных циклах,	2 Гц.
Установленная мощность	85 кВт
Индикация нагрузки, деформации и перемещения осуществляется цифровым вольтметром	
Машина обеспечивает воспроизведение режимов нагружения и деформирования с развёрткой по частоте	
Вероятность безотказной работы машины	от 0,9 до 1000 ч.
Максимальное время непрерывной работы машины	8 ч.

#### Расчет сечения образца

По известной формуле сопромата напряжение в наиболее напряженном сечении по надрезу образца нагружаемого по схеме трехточечного изгиба будет

$$\sigma = M_{max} / W,$$

где  $M_{max}$  – максимальный изгибающий момент;  
 $W$  – момент сопротивления образца.

Изгибающий момент в наиболее напряженном сечении образца будет

$$M_{max} = P_{max} \cdot l / 2,$$

где  $P_{max}$  – максимальное усилие развиваемой машиной;

$l = l_0 / 2$  – половина расстояния между опорами, на которые опирается образец.

Момент сопротивления образца прямоугольного сечения рассчитывается по формуле

$$W = BH^2 / 6,$$

где  $B$  – ширина;

$H$  – высота призматического образца.

У машины УРС 50/50 расстояние между опорами, на которые опираются образцы в зависимости от их размера, составляет

$$L_{01} = 165 \text{ мм}$$

$$L_{02} = 310 \text{ мм.}$$

При усилии 500 кН максимальный изгибающий момент в зависимости от расстояния между опорами составляет

$$M_{max1} = 500000 \cdot 165 / 4 = 20625000 \text{ Н/мм},$$

$$M_{max2} = 500000 \cdot 310 / 4 = 38750000 \text{ Н/мм.}$$

Определим максимальное сечение образца из материала с пределом прочности  $\sigma_B = 1000 \text{ Н/мм}^2$ . При  $L_0 = 165 \text{ мм}$ .

$$W_{max} = M_{max1} / \sigma_B = 20625000 / 1000 = 20625 \text{ мм}^3$$

$$B_{max1} = \sqrt[3]{20625 \cdot 6 / 4} = \sqrt[3]{30935} = 31,5 \text{ мм}$$

при  $L_0 = 310 \text{ мм}$ .

$$W_{max2} = M_{max2} / \sigma_{ПУ} = 38750000 / 1000 = 38750 \text{ мм}^3$$

$$B_{max2} = \sqrt[3]{38750 / 4} = \sqrt[3]{58200} = 38,8 \text{ мм}$$

Для образцов с надрезом глубиной  $l_0 = 0,2 H$  можно назначить в первом случае максимальное сечение образца с вышеуказанными пределом прочности 35x70, а во втором случае – 45x90.

Исходя из этого, можно рекомендовать следующие размеры образца:

Таблиця

Рекомендуемые размеры образца

B, мм	H, мм	$l = 0,2 H$ , мм	L, мм
15	30	6	260
20	40	8	260
25	50	10	260
30	60	12	260
35	70	14	260
40	80	16	360
45	90	18	360

В продолжение ранее проведенных исследований [1-3] на машине УРС 50/50 нами проведены испытания на малоцикловую усталость на воздухе стальных призматических образцов при двух формах цикла: синусоидальной и трапецеидальной.

Испытания вели таким образом, чтобы используя один и тот же образец, получить информацию о зарождении трещины и кинетике ее роста на начальном этапе развития. Призматические образцы размером 22x44x260 мм с V-образным надрезом из стали 15ХН5ДМФ по схеме трёхточечного изгиба при частоте 1 Гц деформировали в режиме мягкого нагружения ассиметричным циклом со следующими параметрами:  $R = 0,5$  ( $\sigma_{max} = 0,5 \sigma_{0,2 \text{ изг.}}$ ;  $\sigma_{min} = 0,22 \sigma_{0,2 \text{ изг.}}$ ). Период выдержки в нагруженном и разгруженном состоянии при трапецеидальном цикле составлял 0,2 с. Испытания прекращали при достижении длины трещины около 4 мм.

Из результатов испытаний, представленных на рис. 1 можно заключить, что при синусоидальном цикле трещина зарождается и растет быстрее, чем при трапецеидальном. При испытаниях с синусоидальным циклом трещина зарождается примерно в 2 раза быстрее, чем при трапецеидальном. Для сравнения в нашем опыте было зафиксировано число циклов при появлении (при обеих формах цикла) трещины длиной 0,7 мм. Для синусоидального цикла это произошло на 807-м цикле, для трапецеидального – на 1850-м. Скорость распространения трещины на начальном этапе ее роста на участке длиной 0,7-1,5 мм составила для синусоидального цикла  $0,7-0,83 \cdot 10^{-3}$  мм/цикл, для трапецеидального –  $0,4-0,5 \cdot 10^{-3}$  мм/цикл на участке длиной 1,5 до 4 мм соответственно  $1,03-1,11 \cdot 10^{-3}$  и  $0,65-0,71 \cdot 10^{-3}$  мм/цикл.

Для испытаний в морской воде (рис. 2) и в других жидких агрессивных средах изготовлена фторопластовая ячейка (3), закрепленная на испытуемом образце (4) с помощью струбцин. Наблюдение за ростом усталостной трещины производится с помощью микроскопа МБС-1 через плексигласовое окошко в центре ячейки. Конструкция опоры (5) предусматривает возможность испытаний на машине УРС-50/50 образцов длиной 260-360 мм.

Аналогичные испытания в агрессивных средах планируется провести впоследствии.

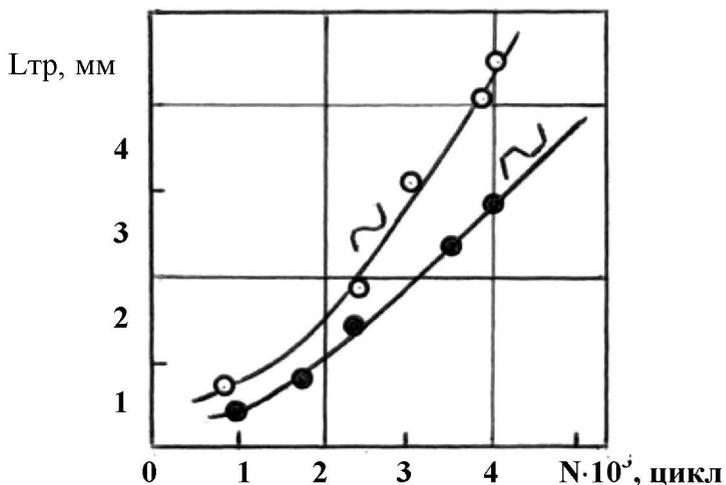


Рис. 1. Кинетика роста трещин МЦУ при испытаниях с синусоидальной и трапецидальной формами цикла

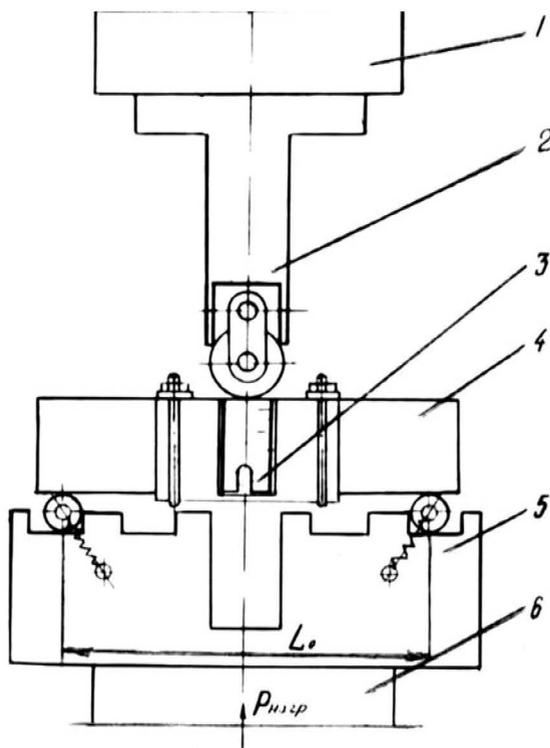


Рис. 2. Схема испытаний призматических образцов в жидкой коррозионной среде:

1 – преобразователь силы; 2 – нож с роликом; 3 – коррозионная ячейка; 4 – образец; 5 – опоры; 6 – плунжер нагружающего устройства

**Выводы.** Испытательная машина УРС-50/50 позволяет с достаточной точностью проводить испытания на малоцикловую усталость образцов и элементов конструкций натуральных толщин в условиях, приближенных к эксплуатационным, что дает значительный выигрыш во времени и экономии денежных средств. При испытании стальных образцов натуральных толщин усталостная трещина при синусоидальном цикле зарождается и растет быстрее, чем при трапецеидальном.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобзарук А.В., Сабуров А.И., Петров Л.Н. О применимости результатов коррозионно-механических испытаний материалов к реальной оценке прочности суднокорпусных конструкций // *Проблемы техники*. – 2004. – № 3. – С. 19-28.
2. Кобзарук А.В. Эффект масштаба при малоциклово́й усталости в морской воде // *Вісник ОНМУ*. – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 11. – С. 221-226.
3. Кобзарук А.В., Сабуров А.И., Смажило Б.В. Стационарный электродный потенциал стали в морской воде в зависимости от частоты и формы цикла малоциклового нагружения // *Вісник ОНМУ*. – Одеса: ОНМУ, 2010. – Вип. 30. – С. 177-187.

*Стаття надійшла до редакції 20.08.2013*

**Рецензент** – кандидат технічних наук, завідувач кафедри «Технологія матеріалів» Одеського національного морського університету **О.І. Стальніченко**

УДК 621.873.254

Е.В. Никитин

### УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХЗВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВЕШИВАНИЯ ГРУЗА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ СТРОПАМИ ВТОРИЧНОГО ПОДВЕСА

Для двухзвенной системы подвешивания груза с параллельным положением строп вторичного подвеса получены аналитические выражения положения устойчивого равновесия системы с учетом геометрии связей систем, отношения веса траверсы и груза ( $\frac{p}{P_c}$ ), а также координат центра тяжести (ЦТ) груза. Доказано, что система будет в положении устойчивого равновесия (несмотря на ее возможное отклонение от исходного положения и изменение формы), если ЦТ груза находится внутри или на границах равнобедренного треугольника (треугольника безопасности), основание которого – это платформа вторичного подвеса, а высота зависит от высоты первичного подвеса и отношения  $\frac{p}{P_c}$ .

**Ключевые слова:** двухзвенная система подвешивания груза, устойчивое и неустойчивое равновесие, треугольник безопасности.

Для двохланкової системи підвішування вантажу з паралельним положенням строп вторинного підвісу отримано аналітичні вирази положення стійкої рівноваги системи з урахуванням геометрії зв'язків системи, відносини ваги траверси і вантажу ( $\frac{p}{P_c}$ ), а також координат центру ваги (ЦВ) вантажу. Доведено, що система буде в положенні стійкої рівноваги (незважаючи на її можливе відхилення від початкового положення і зміну форми), якщо ЦВ вантажу знаходиться всередині або на кордонах рівнобедреного трикутника (трикутника безпеки), основа якого – це платформа вторинного підвісу, а висота залежить від висоти первинного підвісу і відношення  $\frac{p}{P_c}$ .

**Ключові слова:** двохланкова система підвішування вантажу, стійка і нестійка рівновага, трикутник безпеки.

*For two-chain suspension arrangement of a cargo, the secondary slings of which are parallel each other, the approach and analytical equations for calculating positions of the stable equilibrium of the arrangement have been developed. These equations have taken into account a specific geometry*

of the arrangement, ratio between masses of spreader and the cargo ( $\frac{p}{P_c}$ ), and coordinates of the center of gravity (CG) of the cargo. It has been also shown and proved that the arrangement is in the stable equilibrium (even though its primary and secondary suspension chains might be deflected) if the CG of the cargo is placed within or on the borders of an isosceles triangle (triangle of safety) the base of which is the base of the secondary suspension chain, and the height of this triangle is affected from the height of the secondary suspension and ratio  $\frac{p}{P_c}$ .

**Keywords:** suspension arrangement of a cargo, stable and unstable equilibrium, triangle of safety.

**Введение.** Проведение грузоподъемных операций на судне иногда требует применения достаточно сложных систем подвешивания грузов к гаку подъемного устройства (ПУ), например, таких как показано на рис. 1. На этом рисунке представлена двухзвенная система подвешивания габаритного груза 1 к гаку подъемного устройства 8. При этом сам груз 1 непосредственно прикреплен к транспортировочной платформе 2, которая с помощью гибких тросов 3, 4 соединена с траверсой 5, а последняя, в свою очередь, гибкими стропами 6, 7 закреплена на гаке ПУ 8 (рис.1). Траверсу 5 вместе со стропами 6, 7 называют *первичным подвесом*, а груз на платформе вместе со стропами 3, 4 – *вторичным подвесом*.

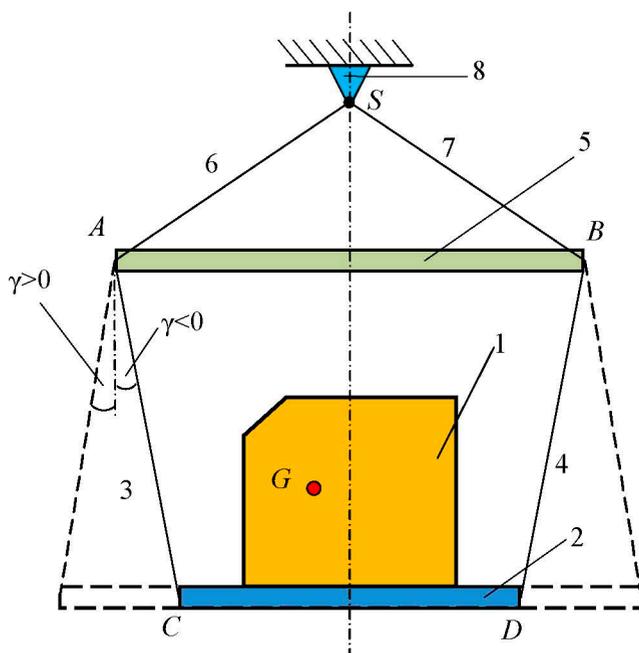


Рис. 1

Опыт применения таких двухзвенных систем подвешивания показывает, что при определенных условиях они могут оказаться неустойчивыми, так как в отличие, например, от однозвенных систем, каждый из подвесов (первичный и вторичный) может отклоняться от положения равновесия независимо от другого, воздействуя при этом на него и усиливая неустойчивость системы подвешивания в целом. Ситуация часто усугубляется еще и тем, что центр тяжести (ЦТ) груза, который обычно расположен выше платформы CD, может быть изначально смещен относительно вертикали, проходящей через точку подвеса S (гака ПУ). Это приводит к деформации системы подвешивания после того как груз отрывается от причала (судна), а также возможно и к потере устойчивости ее равновесия.

Несмотря на то, что двухзвенные системы подвешивания используются при проведении подъемных работ на судне, их устойчивость изучена недостаточно. Так например, в работах [1, 2] предложен подход и методика оценка предельной высоты ЦТ груза относительно платформе CD при параллельном положении строп вторичного подвеса. Однако, она не пригодна для определения положения равновесия и оценки устойчивости системы, если ЦТ груза расположен несимметрично относительно точки подвеса S и платформы CD.

У системы подвешивания стропы вторичного подвеса AC, BD могут быть параллельны друг другу ( $\gamma = 0$ ), могут расходиться в стороны ( $\gamma > 0$ ) или сходиться вместе ( $\gamma < 0$ ) при движении книзу (рис.1). Все это имеет значение для анализа устойчивости и разработки конкретных расчетных методов, то есть требует отдельного рассмотрения. Поэтому предметом данной статьи будут системы подвешивания с параллельными стропами вторичного подвеса ( $\gamma = 0$ ) рис. 2. Другие варианты систем будут рассмотрены в дальнейшем.

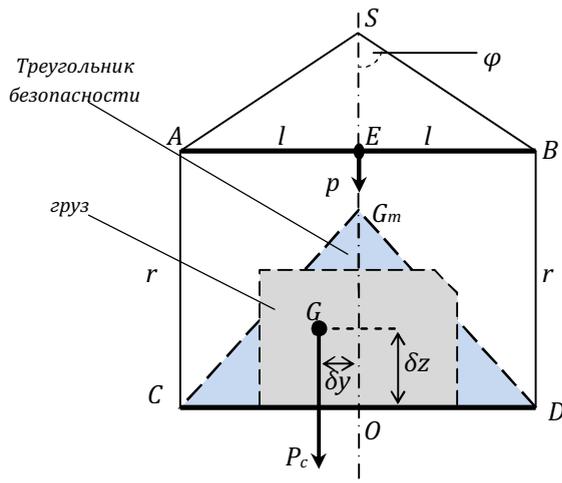


Рис. 2

Поэтому, целью данной статьи является исследование условий устойчивого равновесия двухзвенной системы подвешивания груза с параллельными стропами вторичного подвеса и определение области безопасного расположения ЦТ груза на платформе CD.

**Результаты исследования.** Итак пусть стропы AC и BD параллельны друг другу ( $\gamma = 0$ ), при этом, на гаке ПУ (точка S) с помощью тросов SA и SB равной длины закреплена траверса AB длиной  $2l$  и весом (силой тяжести)  $p$ . Угол между тросом SA (SB) и отрезком OE ( $AE=EB=l$ ) равен  $\varphi$ . К траверсе AB с помощью тросов AC и BD длиной  $r$  подвешена платформа CD длиной  $2l$ , на которой жестко закреплен груз весом  $P_c$ . Центр тяжести груза, (точка G) смещен на расстояние  $\delta u$  от середины платформы CD и приподнят на ней на высоту  $\delta z$  (рис. 2).

Вначале при заданных характеристиках определим условия равновесия системы подвешивания, используя для этого методы классической теоретической механики [3-8]. При этом представленную систему можно рассматривать как механическую систему, состоящую из идеальных голономных связей. Две из этих связей (траверса AB и платформа CD с грузом) могут быть рассмотрены как идеальные голономные и двусторонние связи, а все тросы – как невесомые нити, то есть идеальные голономные и односторонние связи [3-5]. Очевидно также, что в области равновесных состояний системы подвешивания все ее связи можно рассматривать как стационарные (геометрические), то есть не зависящие от времени [3-8]. Таким образом, нашу систему (в области равновесных состояний) можно считать как систему с идеальными голономными и геометрическими (стационарными) связями.

При сделанных выше предположениях необходимо далее определить число степеней свободы системы, задать обобщенные переменные и для общего случая положения системы определить действующие на нее обобщенные силы [3-8]. Нетрудно убедиться, что при заданных ограничениях наша система имеет две степени свободы и, соответственно, должна иметь две обобщенные координаты, которые будут однозначно определять ее положение в пространстве (на плоскости). Таковыми могут быть углы  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 3).

Первый – это угол отклонения первичного подвеса от вертикальной оси, проходящей через точку подвеса S (угол между вертикальной осью SZ и отрезком SE – рис. 3). Второй угол  $\beta$  – это угол отклонения вторичного подвеса относительно первичного (по сути это угол между стропами AC, BD и перпендикулярами к траверсе AB). При таких условиях обобщенные силы системы можно определить либо используя принцип возможных перемещений [3-8] либо путем вычисления силовой функции системы (поскольку силы, действующие на нее, являются потенциальными) [3]. Предварительно были использованы оба метода, при этом второй из них автору показался более простым. Поэтому он и будет изложен в дальнейшем.

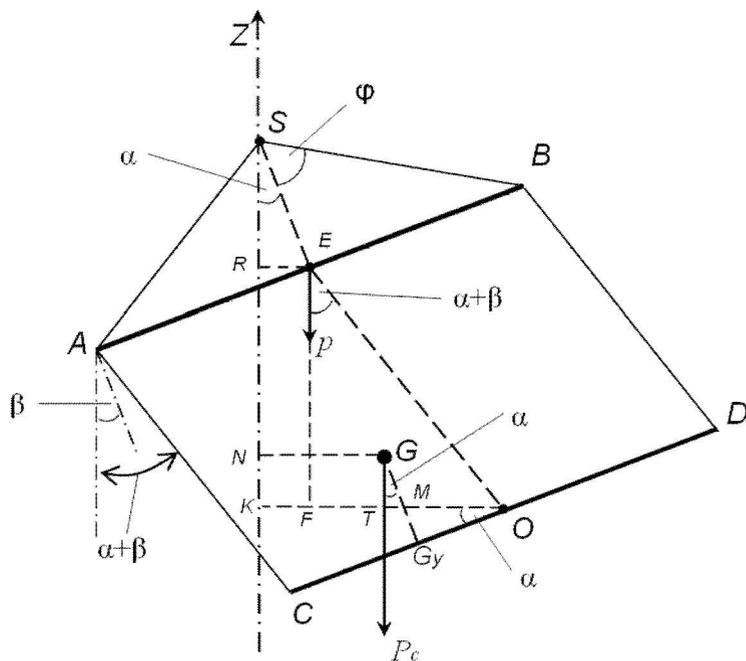


Рис. 3

Итак, вычислим потенциальную энергию системы  $\Pi(\alpha, \beta)$  как величину обратную ее силовой функции  $U(\alpha, \beta)$  [3]. Если направить координатную ось  $Sz$  вертикально вверх (рис. 3), то потенциальная энергия системы относительно точки подвеса  $S$  может быть выражена следующим образом:

$$\Pi = -p \times SR - P_c \times KS, \quad (1)$$

где  $SR$  и  $KS$  – вертикальные расстояния активных сил системы относительно точки отсчета  $S$ .

Выполнив дополнительные построения, как показано штриховыми линиями на рис. 3, из прямоугольного треугольника  $SRE$  найдем

$$SR = SE \times \cos \alpha = l \times \operatorname{ctg} \varphi \times \cos \alpha, \quad (2)$$

а из прямоугольного треугольника  $EFO$  определим

$$EF = RK = EO \times \cos(\alpha + \beta) = r \times \cos(\alpha + \beta). \quad (3)$$

Длину отрезка  $NK$  можно найти, рассматривая прямоугольные треугольники  $GMT$  и  $MG_yO$

$$NK = GT = GM \times \cos \alpha = (GG_y - MG_y) \cos \alpha = [\delta z - (OG_y \times \operatorname{tg} \alpha)] \times \cos \alpha = \delta z \times \cos \alpha - \delta y \times \sin \alpha \quad (4)$$

Таким образом, отрезок  $NS$  может быть вычислен следующим образом:

$$NS = SR + RK - NK = l \operatorname{ctg} \varphi \times \cos \alpha + r \cos(\alpha + \beta) - \delta z \cos \alpha + \delta y \sin \alpha \quad (5)$$

Обозначим высоту первичного подвеса  $OE$  буквой  $v = l \times \operatorname{ctg} \varphi$ . Тогда с учетом вышеизложенного, потенциал системы будет равен

$$\Pi = -pv \cos \alpha - P_c [v \cos \alpha + r \cos(\alpha + \beta) - \delta z \cos \alpha + \delta y \sin \alpha], \quad (6)$$

а обобщенные силы системы (обозначим их  $Q_\alpha$  и  $Q_\beta$ ), следуя [3], будут равны

$$Q_\alpha = -\frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} = -pv \sin \alpha - P_c (v - \delta z) \sin \alpha - P_c r \sin(\alpha + \beta) + P_c \delta y \cos \alpha \quad (7)$$

$$Q_\beta = -\frac{\partial \Pi}{\partial \beta} = -P_c r \sin(\alpha + \beta). \quad (8)$$

Для равновесия механической системы необходимо и достаточно, чтобы все обобщенные силы, соответствующие выбранным обобщенным координатам, были равны нулю [3]. Таким образом, для определения условий равновесия исследуемой нами системы необходимо, чтобы

$$Q_\alpha = -pv \sin \alpha - P_c (v - \delta z) \sin \alpha - P_c r \sin(\alpha + \beta) + P_c \delta y \cos \alpha = 0 \quad (9)$$

$$Q_\beta = -P_c r \sin(\alpha + \beta) = 0 \quad (10)$$

Решая систему (9), (10), можно получить

$$\beta = -\alpha \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta y}{v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - \delta z} \quad (12)$$

Равенство (11) означает, что в условиях равновесия стропы вторичного подвеса AC и BD всегда направлены строго вертикально. Полученные выражения (11), (12) определяют необходимые и достаточные условия равновесия двухзвенной системы подвешивания. Используя, в частности, выражение (12), можно определить угол отклонения первичного подвеса  $\alpha$ , при котором система подвешивания будет находиться в положении равновесия. Из этого выражения также следует, что при симметричном положении ЦТ груза на платформе CD ( $\delta y = 0$ ) система будет находиться в равновесии при  $\alpha = 0$ . Однако, это справедливо только если  $\delta z < \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) v$ , так как в противном случае угол  $\alpha$  становится отрицательным (что противоречит здравому смыслу – ЦТ груза смещен влево, а первичный подвес поворачивается вокруг точки подвеса по часовой стрелке, то есть смещается так же влево). Неясна также пока ситуация когда  $\delta z = \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) v$ , так как в правой части уравнения (12) появляется неопределенность  $\left(\frac{0}{0}\right)$ .

Если  $\delta z = 0$ , то из уравнения (12) следует, что при по мере поперечного смещения ЦТ груза от середины платформы CD ( $\delta y = 0$ ) до некоторого значения  $\delta y \neq 0$  угол наклона первичного подвеса  $\alpha$  будет расти. При этом он достигнет максимального значения  $\alpha_{max}$  при  $\delta y = l$ , то есть когда ЦТ груза будет находиться в точке C (рис. 3). Очевидно, что такое поперечное смещение груза является предельно возможным для сохранения целостности связей системы и выполнения условий ее равновесия. При этом угол  $\alpha_{max}$  можно вычислить следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha_{max} = \frac{l}{v\left(\frac{p}{P_c} + 1\right)}. \quad (13)$$

Анализируя (13), можно показать, что система будет находиться в равновесии с максимальным углом  $\alpha_{max}$  при любой комбинации величин  $\delta y$  и  $\delta z$  (координат ЦТ груза), при которой выполняется следующее соотношение:

$$\delta y = l \times \left[ 1 - \frac{\delta z}{v\left(\frac{p}{P_c} + 1\right)} \right]. \quad (14)$$

Соотношение (14) – это уравнение прямой, определяющее границу (область) возможных положений ЦТ груза относительно платформы CD, при которых система будет находиться в положении равновесия. По существу, эта область представляет собой равнобедренный треугольник  $G_m CD$  (назовем его *треугольником безопасности*), в основании которого находится платформа CD, а высотой является величина (рис. 2)

$$\delta z_m = \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) v = \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) l \times ctg\varphi. \quad (15)$$

Если верхняя траверса невесома ( $p = 0$ ), то  $\delta z_m = v$ , то треугольник безопасности  $G_mCD$  становится равным треугольнику  $SAB$  (рис. 2), то есть эквивалентен геометрии первичного подвеса. Примечательно также, что в уравнения (11)-(13) не входит величина  $r$ , то есть, условия равновесия системы не зависят от длины строп вторичного подвеса.

Теперь необходимо убедиться, что равновесие системы в границах треугольника безопасности является устойчивым. Известно, что состояние равновесия механических систем с идеальными и стационарными связями в консервативном силовом поле (каковыми и являются силы тяжести) будет устойчивым, если во всех этих состояниях равновесия потенциальная энергия системы достигает своего минимума (теорема Лагранжа-Дирихле) [5, 7]. Наша система относится именно к таковым и имеет при этом две степени свободы. Поэтому, для определения устойчивости положений равновесия необходимо вначале определить вторые производные потенциальной функции нашей системы  $\Pi(\alpha, \beta)$ , а именно

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Pi}{\partial \alpha^2} &= pv \cos \alpha + P_c(v - \delta z) \cos \alpha + P_c r \cos(\alpha + \beta) + P_c \delta y \sin \alpha = \\ &= P_c \left[ v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - \delta z \right] \cos \alpha + P_c r \cos(\alpha + \beta) + P_c \delta y \sin \alpha \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial \alpha \partial \beta} = P_c r \cos(\alpha + \beta) \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial^2 \beta} = P_c r \cos(\alpha + \beta) \quad (18)$$

Далее необходимо вычислить так называемые обобщенные коэффициенты жесткости [7], то есть значения производных (16)-(18) при  $\alpha$  и  $\beta$ , в которых система находится в положении равновесия. Естественно предположить, что если система будет в устойчивом положении равновесия на боковых сторонах треугольника безопасности (рис.3), то она будет устойчива и в остальных положениях равновесия. Поэтому вычислим значения производных (16)-(18) при значениях  $\alpha_{max}$ , определяемого из выражения (15) и  $\beta = -\alpha_{max}$ . Если при этом учесть, что [9]

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\alpha}}; \quad \sin \alpha = \frac{tg\alpha}{\sqrt{1+tg^2\alpha}}, \quad (19)$$

ТО ОКОНЧАТЕЛЬНО ПОЛУЧИМ

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= \frac{\partial^2 \Pi}{\partial \alpha^2} [\alpha_{max}, \beta = -\alpha_{max}] = \\
 &P_c \times \left\{ \frac{\left[ v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - \delta z \right] \times v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)}{\sqrt{v^2 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)^2 + l^2}} + \frac{l \times \left[ 1 - \frac{\delta z}{v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)} \right] \times v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)}{\sqrt{v^2 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)^2 + l^2}} \right\} + P_c r = \\
 &= \frac{P_c v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)}{\sqrt{v^2 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)^2 + l^2}} \times \left\{ \left[ v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - \delta z \right] + l \times \left[ 1 - \frac{\delta z}{v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)} \right] \right\} + P_c r \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$c_{12} = c_{21} = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial \alpha \partial \beta} [\alpha_{max}, \beta = -\alpha_{max}] = P_c r \quad (21)$$

$$c_{22} = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial^2 \beta} [\alpha_{max}, \beta = -\alpha_{max}] = P_c r. \quad (22)$$

Для того чтобы система была устойчивой необходимо и достаточно, чтобы  $c_{11} > 0$  и  $\Delta = c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21} > 0$  [7]. Из выражения (19) видно, что при всех  $\delta z \leq v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)$  оно будет положительным, то есть

$$c_{11} > 0. \quad (23)$$

Теперь вычислим  $\Delta$

$$\begin{aligned}
 \Delta &= c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21} = \\
 &= \left[ \frac{P_c v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)}{\sqrt{v^2 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)^2 + l^2}} \times \left\{ \left[ v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - \delta z \right] + l \times \left[ 1 - \frac{\delta z}{v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)} \right] \right\} + P_c r \right] \\
 &\quad \times P_c r - (P_c r)^2 = \\
 &= \left[ \frac{P_c v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)}{\sqrt{v^2 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)^2 + l^2}} \times \left\{ \left[ v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - \delta z \right] + l \times \left[ 1 - \frac{\delta z}{v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)} \right] \right\} \right] \times P_c r \quad (24)
 \end{aligned}$$

Анализ выражения (24) также показывает, что при  $\delta z \leq v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)$  оно является положительным

$$\Delta = c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21} > 0. \quad (25)$$

Таким образом, необходимые и достаточные условия для устойчивого равновесия системы выполнены. Если эти условия выполнены на границах треугольника безопасности, определяемого уравнением (14), то логично предположить, что они будут выполнены и внутри него. Иными словами, равновесие нашей системы будет устойчивым при положении ЦТ груза, расположенного внутри треугольника безопасности (рис. 2), включая его границы. Следует также заметить, что в соответствии с (19)-(24) вершина треугольника безопасности  $\left[ \delta y = 0, \delta z = v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) \right]$

также является точкой устойчивого равновесия системы.

**Пример.** Пусть необходимо поднять с помощью крана на судно габаритный груз весом (массой)  $P_c = 160$  т. Груз стоит на платформе CD, при этом массой платформы по сравнению с грузом можно пренебречь. Предполагается поднимать груз, используя двухзвенную систему подвешивания, представленную на рис. 2. Траверса AB длиной 8 м имеет массу  $p = 30$  т. Остальные размеры системы подвешивания следующие:  $AB = CD = 2l = 8$  м, стропы  $AS = BS = 6$  м и  $AC = BD = r = 7$  м. ЦТ груза размещен симметрично относительно центра платформы (точки O), а высота ЦТ над платформой – 4,5 м. Координаты ЦТ известны с точностью  $\pm 0,2$  м. Определить, будет ли такая система подвешивания устойчива. Если да, то рассчитать угол отклонения первичного подвеса и платформы CD от исходного положения.

**Решение.** Поскольку координаты ЦТ груза известны неточно, то рассмотрим их значения, соответствующие наиболее критичным для устойчивости системы подвешивания. Для определенности будем полагать, что ЦТ груза смещен влево, то есть  $\delta y = 0,2$  м, при этом  $\delta z = 4,7$  м.

1) вначале вычислим геометрические характеристики системы подвешивания, необходимые для решения задачи, а именно

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{l}{AS}\right) = \arcsin\left(\frac{4}{6}\right) = 41,8^\circ$$

$$v = l \times \operatorname{ctg} \varphi = 4 \times \operatorname{ctg} 41,8^\circ = 4,47 \text{ м}$$

2) при таких исходных данных вычислим правую часть уравнения (14)

$$l \times \left[ 1 - \frac{\delta z}{v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right)} \right] = 4 \times \left[ 1 - \frac{4,7}{4,47 \left( \frac{30}{160} + 1 \right)} \right] = 0,456 \text{ м.}$$

Это число является максимально возможным поперечным смещением ЦТ ( $\delta y_{max}$ ), при котором система останется устойчивой. Так как

$$\delta y = 0,2 \text{ м} < 0,456 \text{ м} = \delta y_{max},$$

то можно утверждать, что наш груз не выходит за рамки треугольника безопасности, то есть система будет устойчивой.

3) по формуле (12) вычислим угол отклонения первичного подвеса от исходного положения

$$\alpha = \arctg \left[ \frac{\delta y}{v \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - \delta z} \right] = \arctg \left[ \frac{0,2}{4,47 \left( \frac{30}{160} + 1 \right) - 4,7} \right] = 18,2^\circ$$

На такой же угол наклонится и платформа CD (рис. 2).

Очевидно, что полученный угол отклонения первичного подвеса (и платформы CD) от исходного состояния достаточно большой (хотя равновесие системы и будет устойчивым). При необходимости уменьшить этот угол координаты ЦТ груза должны быть уточнены, после чего необходимо вновь выполнить вышеприведенные расчеты.

### Выводы

1. Для системы подвешивания с параллельным положением строп вторичного подвеса ( $\gamma = 0$ ) получены аналитические выражения положения равновесия системы относительно точки подвеса с учетом геометрии связей системы ( $\varphi$ ,  $l$ ,  $r$ ) веса траверсы  $p$  и груза  $P_c$ , а также координат ЦТ груза ( $\delta y$ ,  $\delta z$ ) на платформе вторичного подвеса. Получена формула для расчета угла отклонения первичного подвеса  $\alpha$  в положении равновесия в случае несимметричного положения ЦТ груза на платформе CD (то есть при  $\delta y \neq 0$ ). При этом показано, что тросы вторичного подвеса AC и BD в положении равновесия всегда направлены вертикально.

2. Показано, что область допустимых положений ЦТ груза на платформе CD, при котором система подвешивания будет находиться в положении равновесия (возможно, что и в деформированном состоянии, но без нарушения целостности связей), представляет собой *равнобедренный треугольник* с основанием, равным длине платформы CD и высотой  $\delta z_m$ , прямо пропорциональной высоте первичного подвеса  $l \times ctg \varphi$  и

зависящей также от отношения  $\frac{p}{P_c}$ . При  $\frac{p}{P_c} = 0$  этот треугольник идентичен треугольнику первичного подвеса ABS (рис.1).

3. Доказано, что при положении ЦТ груза внутри вышеуказанного равнобедренного треугольника (включая его стороны) выполняются необходимые и достаточные условия устойчивости равновесия системы подвешивания (теорема Лагранжа-Дирихле). Таким образом, нахождение ЦТ груза внутри этого треугольника (предлагается назвать его *треугольником безопасности*) не только обеспечит равновесие системы подвешивания, но и гарантирует устойчивость этого равновесия.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kaps H. *Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS)*. [www.tis-gdv.de](http://www.tis-gdv.de). 2013. – 26 p.
2. Kaps H. *BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0. BBC Chartering & Logistics GmbH & Co. KG*. – 2009. – 68 p.
3. Тарз С.М. *Краткий курс теоретической механики*. – М.: Наука, 1972. – 478 с.
4. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. *Теоретическая механика в примерах и задачах*. – Т. 2. – М.: Наука, 1968. – 624 с.
5. Яблонский А.А. *Курс теоретической механики. В 2-х т.* – М.: Высшая школа, 1971. – 910 с.
6. Бражниченко А.А., Кац В.Л. и др. *Сборник задач по теоретической механике*. – М.: Высшая школа, 1974. – 520 с.
7. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. *Курс теоретической механики*. – Т. 2. – М.: Наука, 1979. – 544 с.
8. Гребенча М.К., Новоселов С.И. *Курс математического анализа*. – Т. 2. – М.: Учпедгиз, 1953. – 560 с.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. – М.: Главиздат, 1953. – 608 с.

*Стаття надійшла до редакції 05.07.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор кафедри «Кораблебудування та океанотехніка» Севастопольського національного технічного університету **А.І. Раков**

УДК 621.873.254

П.М. Стрельцов

### ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ САМОХОДНЫМИ ТАЛЯМИ

*Предложен метод расчета оптимального по времени управления автоматическими самоходными таями при транспортировке ими груза на гибком подвесе. Такое управление может иметь сложную структуру и, вследствие этого, быть неудобным для реализации. Однако, как показывают расчеты, использование оптимального управления может обеспечить существенное повышение производительности.*

**Ключевые слова:** самоходная таль, математическое моделирование, оптимальное управление, гашение колебаний груза.

*Запропонований метод розрахунку оптимального за часом управління автоматичними самохідними таями при транспортуванні ними вантажу на гнучкому підвісі. Таке управління може мати складну структуру і, внаслідок чого, бути незручним для реалізації. Однак, як показують розрахунки, використання оптимального управління може забезпечити суттєве підвищення продуктивності.*

**Ключові слова:** самохідна таль, математичне моделювання, оптимальне управління, гасіння коливань вантажу.

*Methods of calculation of time optimal controls of light travelling cranes during transportation of loads hanging on the wire ropes are proposed. Such controls may to have complicated structure and, thence, to be difficult for realization. But, as calculations show, utilization of optimal controls can provide essential increase of productivity.*

**Keywords:** light travelling crane, simulation model, time optimal control, load sway damping.

**Введение.** Достаточно часто в состав автоматических систем, выполняющих различного рода технологические процессы (АСУ ТП), включают самоходные тали и легкие мостовые краны – сравнительно небольшие грузоподъемные машины, осуществляющие перенос грузов на гибком подвесе. Основной целью автоматического управления подобными машинами в составе АСУ ТП является обеспечение такого их движения, при котором они за кратчайшее время перемещаются на заданное расстояние с полным гашением колебаний подвешенного груза к моменту прихода машины в конечную точку пути.

Требуемый характер изменения управляющего воздействия (управления) на механизмы тали рассчитывается заранее и вносится в память ЭВМ, под контролем которой это управление затем реализуется.

**Постановка задачі.** Общий характер оптимального управления рассмотрен в работах [1; 2]. Однако вопрос о расчете параметров управления для конкретных условий остается нерешенным.

Целью представленного исследования является разработка способов расчета оптимального по быстродействию управления самоходными таями. Основным методом исследования является математическое моделирование движения тали с висящим на гибком подвесе грузом. Для определения требуемого управления используются методы теории оптимального управления движением механических систем, известной как «принцип максимума Понтрягина» [3].

**Содержание и результаты исследования.** Поиск нужных управлений ведется с использованием математической модели, уравнения которой составлены на основе расчетной схемы, показанной на рис. 1.

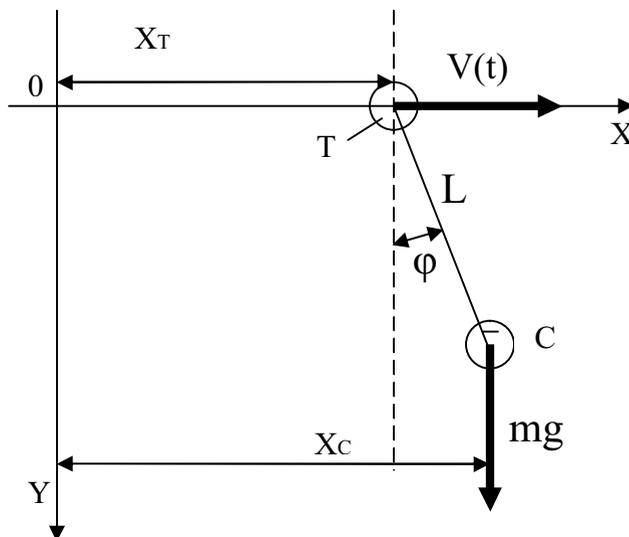


Рис. 1. Расчетная схема системы тележка-груз

Схема состоит из изображающей тележку тали точки  $T$ , перемещающейся горизонтально, и материальной точки  $C$ , изображающей груз, прикрепленный к точке  $T$  гибкой нерастяжимой нитью. В настоящем исследовании рассматриваются случаи перемещения тали с подвесом постоянной длины  $L$ . Колебания груза считают малыми, усилие в канате полагают постоянным и равным весу груза, а движение точки  $C$  (груза) – горизонтальным. Положение полученной двухмассовой системы определяется горизонтальными координатами  $X_T$  (тележки) и  $X_C$  (груза).

Для самоходных талей характерно пренебрежимо малое (практически равно нулю) время переходных процессов, когда при включении двигателя тележка сразу же начинает перемещаться с постоянной скоро-

стью, а при отключении – мгновенно останавливается. Это позволяет в качестве параметра управления принимать скорость  $V(t)$  тележки.

Обычно при управлении тележкой во избежание чрезмерных динамических нагрузок знак скорости не меняют, т.е. допускают перемещение тележки только в сторону конечного положения. При этом ограничение на параметр управления можно записать в виде

$$0 \leq V(t) \leq V_{MAX} . \quad (1)$$

Уравнение движения тележки можно записать в виде дифференциального уравнения первого порядка

$$X'_T = V. \quad (2)$$

Точка  $C$  (груз) перемещается под воздействием горизонтальной составляющей усилия в канате, и уравнение ее движения при отсутствии ускорения тележки таково [ 2; 4]

$$X''_C = \kappa^2 (X_T - X_C), \quad (3)$$

где  $\kappa$  – частота собственных колебаний груза,  $\kappa^2 = g/L$ .

На основании уравнений (2) и (3) можно показать, что при движении тележки с постоянной скоростью груз совершает гармонические колебания относительно вертикали, проходящей через точку подвеса, с периодом  $\tau = 2\pi / \kappa$ .

Чтоб придать результатам исследования обобщающий характер, уравнения математической модели часто записывают в «безразмерном» виде. При переходе к безразмерным переменным (как это сделано в [1]) в качестве единицы скорости выберем значение максимальной допустимой скорости  $V_{MAX}$  тележки, в качестве единицы времени – величину  $t_0 = 1/\kappa$ , обратную частоте свободных колебаний груза, а в качестве единицы длины – отношение  $V_{MAX} / \kappa$ .

Связь между реальными и безразмерными (с индексом «б») параметрами выражается равенствами

$$t = t_b / \kappa; \quad V = V_b V_{MAX}; \quad X = X_b V_{MAX} / \kappa. \quad (4)$$

После подстановки выражений (4) в уравнения (2) и (3) получим уравнения математической модели тали в безразмерных переменных (для упрощения записи индекс «б» опускается)

$$X'_T = V; \quad X''_C = X_T - X_C. \quad (5)$$

Безразмерный период колебаний груза  $\tau = 2\pi$ . Ограничение на безразмерный параметр управления записывается в виде

$$0 < V < 1. \quad (6)$$

Введя новые переменные  $X_1 = X_T$ ,  $X_2 = X_C$ ,  $X_3 = X'_C$ , запишем уравнения (5) в нормальной форме в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных

$$\begin{aligned} X'_1 &= V; \\ X'_2 &= X_3; \\ X'_3 &= X_1 - X_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Сформулируем оптимальную задачу по управлению талью при ее перемещении на заданное расстояние  $S$  из одного состояния покоя в другое.

Определить оптимальное управление  $V^*(t)$ , обеспечивающее перемещение механической системы, описываемой уравнениями математической модели (7), из начального положения ( $X_1 = 0$ ;  $X_2 = 0$ ;  $X_3 = 0$ ;) в заданное конечное ( $X_1 = S$ ;  $X_2 = S$ ;  $X_3 = 0$ ) за кратчайшее время при соблюдении ограничения (6) на параметр управления  $V$ .

Для оценки характера оптимального по быстродействию управления воспользуемся методами теории оптимального управления механическими системами «принцип максимума» [3]. По рекомендациям теории на основе уравнений математической модели (7) составляется выражение для соответствующей ей функции Гамильтона

$$H = \varphi_1 V + \varphi_2 X_3 + \varphi_3 (X_1 - X_2). \quad (8)$$

Входящие в (8) вспомогательные функции  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  определяются (согласно [3]) по формулам

$$\varphi'_1 = -\varphi_3; \quad \varphi'_2 = \varphi_3; \quad \varphi'_3 = -\varphi_2. \quad (9)$$

Откуда

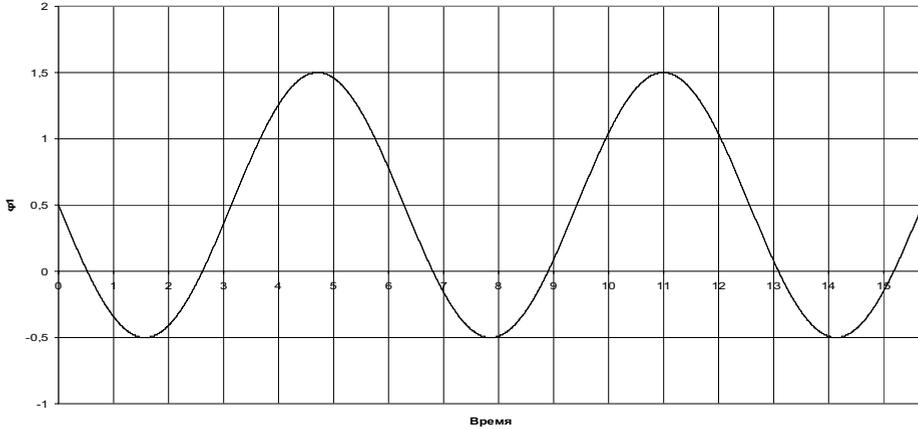
$$\varphi_1^{(3)} + \varphi_1' = 0 \quad (10).$$

Решением линейного однородного дифференциального уравнения (10) является

$$\varphi_1(t) = A \sin(t + \alpha) + B. \quad (11)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $\alpha$  – неизвестные постоянные интегрирования.

Т.е. функция  $\varphi_1(t)$  является синусоидой с периодом  $\tau = 2\pi$  (совпадающим с периодом свободных колебаний груза), ось которой отстоит от оси абсцисс на расстояние  $B$ .



*Рис. 2. График вспомогательной функции  $\varphi_1$*

В соответствии с принципом максимума оптимальное управление  $V^*(t)$  должно доставлять максимум функционалу  $H$ . Т.е., как видно из выражения для  $H$  (8), при положительных значениях функции  $\varphi_1$  управление должно принимать верхнее предельное значение  $V = 1$ , при отрицательных – нижнее  $V = 0$ .

Таким образом, оптимальное управление  $V^*(t)$  является кусочно-постоянной функцией, принимающей на интервалах постоянства предельные значения.

Количество интервалов зависит от длительности  $T$  управления. Так, если  $0 \leq T \leq 2\pi$  (синусоида  $\varphi_1(t)$  пересекает ось абсцисс дважды), управление  $V^*(t)$  будет состоять из трех интервалов, при  $2\pi \leq T \leq 4\pi$  – из пяти, при  $4\pi \leq T \leq 6\pi$  (синусоида  $\varphi_1(t)$  пересекает ось абсцисс 6 раз) – из семи интервалов и т.д. При этом время  $T$  управления будет равно сумме длительностей всех интервалов, а путь  $S$  тележки – численно равным сумме длительностей нечетных интервалов.

Для определения длительностей отдельных интервалов можно предложить использовать фазовые траектории относительного движения груза – графики, отражающие связь между фазовыми координатами – отклонением груза (обозначим его через  $Y_1 = X_1 - X_2$ ) и его относительной скоростью ( $Y_2 = X_1' - X_2'$ ). Как показано в [4], при движении тали с постоянной скоростью (а именно так движется таль на отдельных интервалах) уравнение фазовой траектории будет уравнением окружности

$$Y_1^2 + Y_2^2 = R^2. \quad (12)$$

Фазовые траектории изображаются на фазовой плоскости  $Y_1 - Y_2$  в виде нескольких участков, являющихся дугами окружностей с общим центром  $(0;0)$ . Число участков равно количеству интервалов управления. Фазовая точка, характеризующая текущий момент движения, с течением времени перемещается вдоль дуги по часовой стрелке с постоянной угловой скоростью  $\omega = 1$ , т.е. длительность интервала управления численно равна углу дуги, представляющей этот интервал.

Как указывалось, если значение заданного пути  $S$  находится в пределах  $0 \leq S \leq 2\pi$ , управление будет состоять из трех интервалов. Фазовая траектория при таком управлении представлена на рис. 3 а.

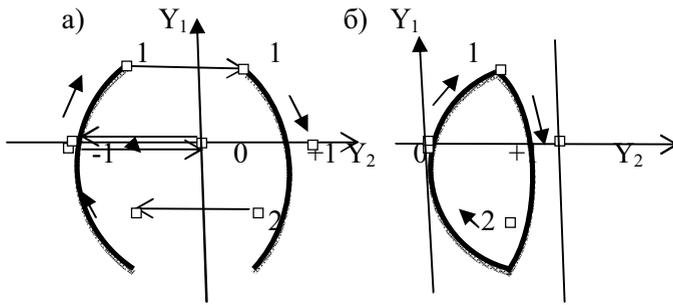


Рис.3. Фазовые траектории при  $S \leq 2\pi$

Как видно из рисунка, фазовая точка из состояния покоя с координатами  $(0; 0)$  в момент начала движения тележки (когда ее скорость мгновенно становится равной 1) скачком влево переходит в точку  $(0; -1)$ , а затем перемещается вверх по дуге с центром  $(0; 0)$ . На границе интервалов (остановка тали) следует скачок вправо на  $+1$ , затем движение вниз по дуге с центром  $(0; 0)$ . На границе между вторым и третьим интервалами происходит скачок на  $-1$  (влево), затем фазовая точка движется по дуге вверх, а в момент окончательной остановки перескакивает в точку  $(0; 0)$ , т.е. система приходит в состояние покоя.

Для удобства изображения и анализа фазовых траекторий их нечетные участки целесообразно сместить вправо на  $+1$ . В этом случае они будут лежать на окружностях с центром в точке  $(0; +1)$  и стыковаться с четными участками (рис. 3 б). При этом первый участок фазовой траектории будет исходить из начала координат, а последний – заканчиваться в нем.

Легко показать, что длительности первого и третьего интервалов равны  $t_1 = t_2 = S/2$ , а длительность второго участка  $t_2 = \pi - t_1$ .

Как следует из этих выражений, при  $S = 2\pi$  длительность второго интервала  $t_2 = 0$ , и оптимальное управление будет состоять из одного интервала длительностью  $2\pi$  (длительность  $T$  движения в этом случае численно равна длине  $S$  пути). Т.е., если включить таль и остановить ее

через промежуток времени равный  $2\pi$ , она окажется в состоянии покоя с неподвижно висящим грузом.

Эту особенность можно использовать для организации квазиоптимальных (близких к оптимальным) состоящих из трех интервалов управлений при любых значениях  $S$ . Для этого нужно выделить из  $S$  участок длиной  $S - 2\pi \leq 2\pi$  и рассчитать для него оптимальное управление. При перемещении на величину  $S$  длительность первого интервала будет равна  $t_1 = 0,5(S - 2\pi)$ , второго  $t_2 = \pi - t_1$  и третьего  $t_3 = t_1 + 2\pi$ .

При длине пути, лежащей в промежутке  $2\pi \leq S \leq 4\pi$  функция  $\varphi_1$  будет пересекать ось абсцисс в четырех точках, а оптимальное управление состоять из пяти интервалов. Фазовые траектории, соответствующие такому управлению, показаны на рис. 4.

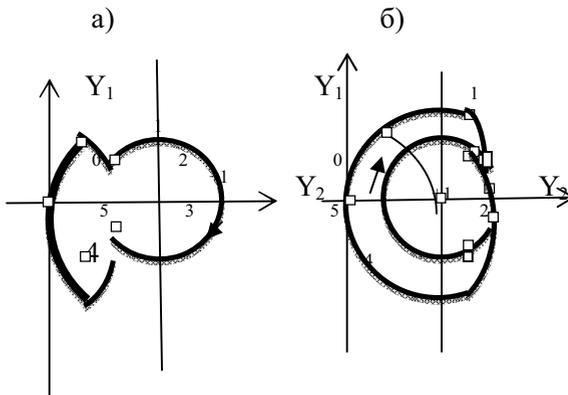


Рис. 4. Фазовые траектории при  $2\pi \leq S \leq 4\pi$

Участки 0 – 1, 2 – 3, 4 – 5, соответствующие нечетным интервалам (таль движется), лежат на окружностях с центром  $(0; 1)$ .

Участки 1 – 2, 3 – 4 соответствуют четным интервалам (таль стоит) и лежат на окружностях с центром  $(0; 0)$ . Фазовые траектории при  $2\pi \leq S < 2\frac{1}{3}\pi$  имеют вид, показанный на рис 4 а, при  $2\frac{1}{3}\pi < S \leq 4\pi$  фазовые траектории имеют вид, показанный на рис 4 б.

Параметры оптимального управления можно определить численно при помощи специально разработанной программы.

Результаты выполненных по программе расчетов позволяют утверждать, что при строго оптимальном управлении время перемещения тележки может быть заметно короче, чем при квазиоптимальном. Разница в длительности может достигать двух временных единиц (или 15 %).



На первом интервале фазовая точка перемещается по дуге 0-1, на втором – по дуге 1-2, на третьем – по дуге 2-3 (по часовой стрелке), на четвертом – по дуге 3-4, на пятом – по дуге 4-5 (по часовой стрелке), на шестом – по дуге 5-6 и, наконец, на седьмом – по дуге 6-7 (груз возвращается в состояние покоя).

Для определения длительностей отдельных интервалов управления можно использовать следующий алгоритм.

1. Задаются значением  $t_1$  первого интервала управления.
2. При выбранном значении первого интервала задаются длительностью  $t_2$  второго интервала так, чтоб она была заведомо больше искомого значения.
3. Определяют длину  $R_a$  хорды дуги 0-1.

$$R_a = 2 \sin(t_1 / 2).$$

4. Определяют угол  $\delta$  (половины дуги 2-5) по формуле

$$\delta = \arctg\left[\frac{R_a \sin(\pi / 2 - t_1 / 2 - t_2)}{R_a \cos(\pi / 2 - t_1 / 2 - t_2) - 1}\right].$$

5. Находят радиус  $R_b$  окружности, на которой лежит фазовая траектория 2-3 третьего интервала

$$R_b = \sqrt{1 + R_a^2 - 2R_a \cos(\pi / 2 - t_1 / 2 - t_2)}.$$

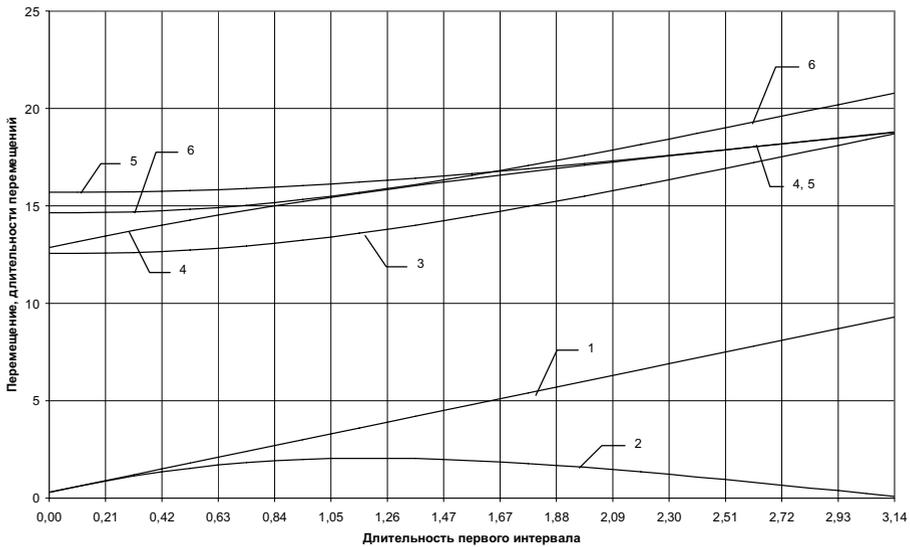
6. Определяют угол  $\nu$ , соответствующий длительности среднего (четвертого) интервала

$$\nu = \arctg\left[\frac{R_b \sin(\delta + t_2)}{R_b \cos(\delta + t_2) + 1}\right].$$

7. Численные значения угла  $\nu$  и половины длительности  $t_2$  второго интервала должны совпадать. Если угол  $\nu$  будет меньше угла  $t_2 / 2$ , то уменьшают на шаг значение  $t_2$  и повторяют вычисления, начиная с этапа 3.

Описанные вычисления продолжают до тех пор, пока не будет достигнуто такое значение  $t_2$ , при котором выполняется условие  $\nu \leq t_2 / 2$ .

На основании рассмотренного алгоритма составлена программа для ЭВМ численного определения параметров оптимального управления  $V^*(t)$ . По результатам расчетов, выполненных по указанной программе, построены представленные на рис. 6 графики зависимости отдельных параметров от длительности  $t_1$  первого интервала. На рисунке обозначены: 1 – длительность  $t_1$  первого интервала; 2 – длительности  $t_2$  четных интервалов; 3 – перемещение  $S$  тали (для промежутка  $4\pi \leq S \leq 6\pi$ ); 4 – длительность  $T_{opt}$  оптимального управления; 5 – длительность  $T_{ko3}$  квазиоптимального управления из трех интервалов; 6 – длительность  $T_{ko5}$  квазиоптимального управления из пяти интервалов.

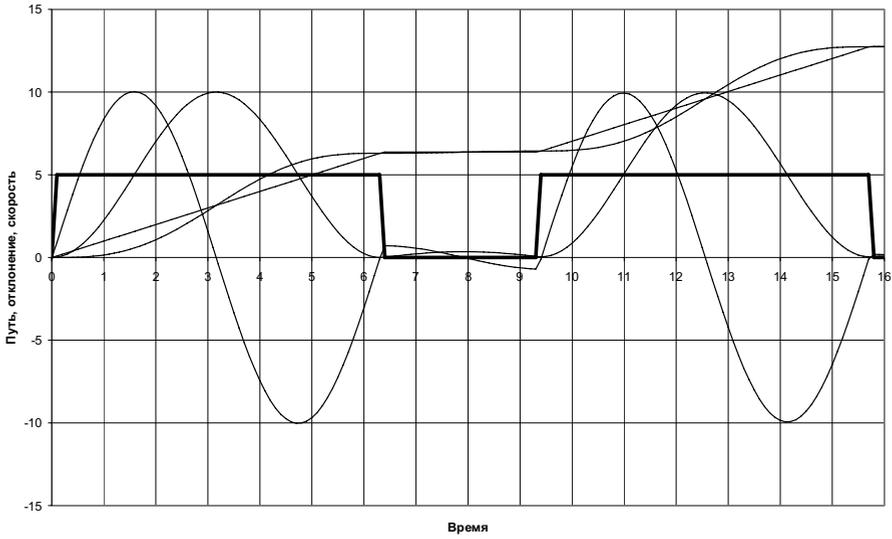


*Рис. 6. Графики продолжительностей перемещения тали*

Как видно из графиков, оптимальное управление обеспечивает заметное сокращение (в среднем на 6 %) длительности перемещения тали.

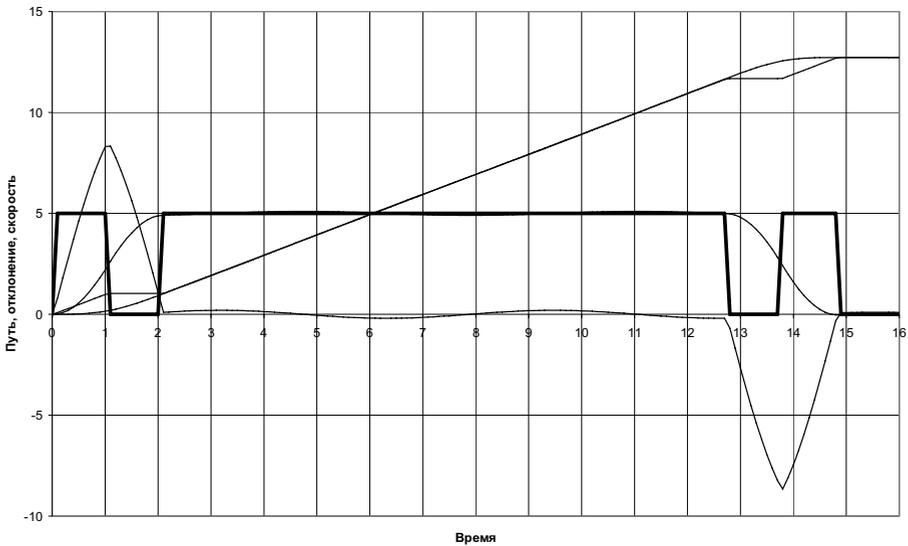
Для подтверждения эффективности предложенных методов расчета и составленной на их основе программы на помещенных ниже рисунках 7, 8 и 9 представлены построенные по результатам расчета графики изменения в зависимости от времени безразмерных параметров движения тали при ее перемещении на расстояние  $S = 12,76$ . На рисунках обозначены 1 – скорость тали (параметр управления); 2 – абсолютная скорость груза; 3 – путь тали; 4 – путь груза; 5 – отклонение груза от вертикали. Для удобства пользования рисунками значения скоростей тали и груза, а также отклонения груза даны в увеличенном (в 5 раз) масштабе.

На рис. 7 представлены графики при квазиоптимальном управлении, состоящем из трех интервалов. Длительность перемещения при таком управлении составит  $T = 15,73$  безразмерных единиц времени.



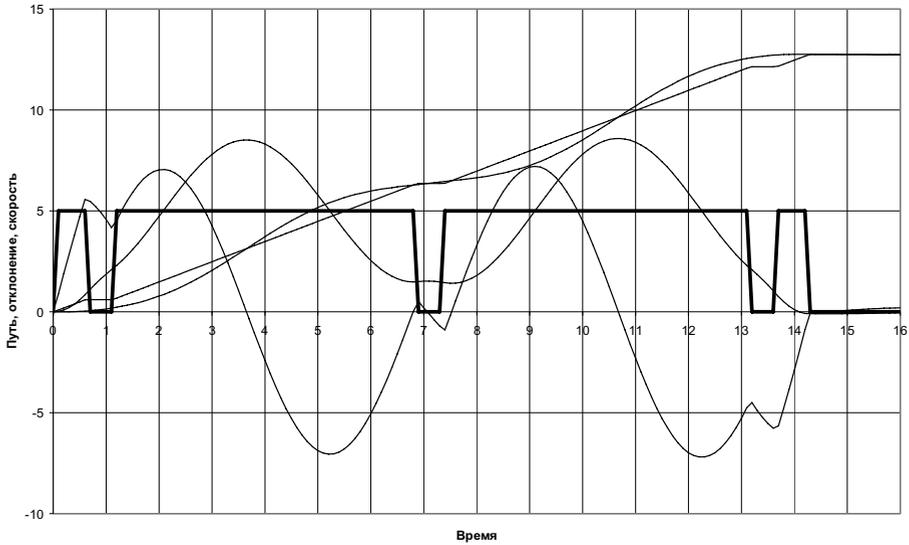
*Рис. 7. Графіки параметрів руху при квазіоптимальному керуванні з трьома інтервалами*

На рис. 8 представлені графіки при другому виді квазіоптимального керування, що складається з п'яти інтервалів. В цьому випадку тривалість переміщення тележки буде рівна  $T = 14,84$ .



*Рис. 8. Графіки параметрів руху при квазіоптимальному керуванні з п'ятьма інтервалами*

На рис. 9 представленны графики при строго оптимальном управлении. Длительность перемещения при таком управлении будет наименьшей и составлять 14,27 единиц времени.



*Рис. 9. Графики параметров движения при оптимальном управлении*

### Выводы

1. Оптимальное управление  $V^*(t)$  при перемещении тали с грузом на гибком подвесе постоянной длины является релейной функцией. На каждом из интервалов управление принимает предельное (верхнее или нижнее) допустимое значение. Количество интервалов оптимального управления увеличивается при увеличении расстояния  $S$  передвижения тали.

2. При перемещении на малые расстояния ( $0 \leq S \leq 2\pi$ ) оптимальное управление будет состоять из трех интервалов. При больших перемещениях можно использовать подобное по структуре квазиоптимальное управление, также состоящее всего из трех интервалов (рис. 7). Его достоинством является минимальное число переключений и динамических нагрузок.

3. При  $S \geq 2\pi/3$  можно использовать квазиоптимальное управление другого вида, содержащее 5 интервалов. При таком управлении груз большую часть пути перемещается синхронно с тележкой без раскачивания (рис. 8).

4. Строго оптимальное управление (см. рис. 9) может иметь большое число переключений, что затрудняет реализацию, однако обеспечивает существенное сокращение времени перемещения по сравнению с квазиоптимальными управлениями обоих видов (в среднем на 6 %).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черноусько Ф.Л. *Оптимальное перемещение висящих грузов / Ф.Л. Черноусько, Н.И. Ерофеев, Б.Н. Соколов, П.М. Стрельцов, В.В. Кокоржицкий.* – М.: Институт проблем механики АН СССР, 1976. – Препринт № 74. – С. 56.
2. *Verschoof J. Cranes – Design, Practice and Maintenance (Chapter 6. Sway and Swing; automation of the trolley travelling mechanism) // Professional Engineering Publishing.* – 2002. – P. 167-173.
3. Болтянский В.Г. *Математические методы оптимального управления.* – М.: Наука, 1969. – 408 с.
4. Стрельцов П.М. *Оптимизация управления крановыми установками // Вісник ОНМУ, 2011. – № 33. – С.123-133.*

*Стаття надійшла до редакції 04.02.13*

**Рецензент** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Підйомно-транспортні машини та механізація перевантажувальних робіт» Одеського національного морського університету **М.Ф. Зубко**

УДК 629.543

И.А. Демешкан, А.А. Голиков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МОЙКИ ТАНКОВ НА СОВРЕМЕННОМ  
ТАНКЕРЕ-ХИМОВОЗЕ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ДАННОГО ПРОЦЕССА**

*В данной статье рассмотрены актуальные вопросы, возникающие в процессе эксплуатации танкера-химовоза. В частности, речь идет об оптимизации процедуры моечных операций, включающих в себя как технологический цикл, так и выбор самой концепции мойки, с учетом физико-химических свойств перевозимого груза, покрытия танков и характеристик используемых моечных веществ.*

**Ключевые слова:** танкер-химовоз, мойка танков.

*У даній статті розглянуті актуальні питання, що виникають в процесі експлуатації танкера-хімовоза. Зокрема, йдеться про оптимізацію процедури мийних операцій, які включають в себе як технологічний цикл, так і вибір самої концепції мийки, з урахуванням фізико-хімічних властивостей вантажу, що перевозиться, покриття танків і характеристик використовуваних мийних речовин.*

**Ключові слова:** хімічний танкер, миття танків.

*This article describes the current issues that arise during the chemical tanker's exploitation. In particular, the optimization procedure of washing operations, including both technological cycle as well as the selection of the concept of cleaning, taking into consideration physicochemical properties of the transported cargo, tank's coating and the characteristics of the washing agents, is discussed.*

**Keywords:** chemical tanker, tank Cleaning.

**Рассматриваемая проблема.** В современном мире ежедневно производится десятки тысяч наименований химических продуктов, в связи с этим возникает острая необходимость их транспортировки, в том числе перевозки морем. Довольно часто танкеры-химовозы перевозят различные по составу, физическим и химическим свойствам грузы в одних и тех же танках. Поэтому, наиболее распространенной операцией, производимой на химическом танкере, является *коммерческая мойка грузовых танков*. Процедура эта не так проста, как может показаться на первый взгляд и требует глубоких теоретических знаний, понимания физики процесса и, конечно же, практических навыков, а также должна быть выполнена в соответствии с требованиями международных кодексов и конвенций, инструкциями фрахтователя или грузоотправителя, политикой судовладельца и с наименьшей затратой времени и средств.

**Анализ публикаций.** Процесс мойки танков на химовозе рассматривается во многих источниках зарубежного происхождения, например, таких как [1, 2]. На судах, в основном, используются справочники, изданные определенной фирмой-производителем, например [3, 4]. Существенным недостатком таких пособий является то, что в них рекламируются и подаются к использованию только моющие вещества их собственного производства, хотя на практике существуют более эффективные и дешевые аналоги. Что же касается публикаций отечественных изданий, либо изданий стран ближнего зарубежья, то их совсем мало, например [5].

**Цель.** Исследование основных особенностей мойки танков на современном танкере-химовозе в зависимости от свойств перевозимого груза, типа покрытия танка и характеристик моющих веществ.

**Изложение материалов исследования.** Процесс мойки танков в общем виде может быть представлен следующей последовательностью этапов:

1. Предварительная мойка со сдачей смывок на берег (если требуется).

2. Первоначальная мойка.

3. Окончательная мойка.

4. Вентиляция.

5. Осушка танка.

6. Инспекция танка.

Рассмотрим теперь подробнее каждый этап.

*1. Предварительная мойка.* Предварительную мойку танков, согласно конвенции МАРПОЛ [6], а именно Приложению II «Контроль загрязнения ядовитыми жидкими веществами», и кодексу ИВС [7], следует производить в зависимости от категории химических грузов.

Все химические грузы, перевозимые морем, подразделяются на 4 категории:

- категория X (представляют значительную опасность для живых организмов);

- категория Y (представляют опасность для живых организмов);

- категория Z (представляют незначительную опасность для живых организмов);

- категория OS. **OS (Other Substances)** – другие вещества; грузы, которые не вошли не в одну из вышеперечисленных категорий.

Таким образом, обязательная предварительная мойка осуществляется после выгрузки всех грузов категории X и некоторых грузов категории Y, а именно:

- если груз категории Y – “затвердевающий” (температура которого менее чем на 5 °C выше температуры плавления на выгрузке (при t плавления менее 15 °C); или температура менее чем на 10 °C выше температуры плавления на выгрузке (при t плавления более 15 °C));

- если груз категории Y – “вязкий” (50 mPa·s или более при температуре выгрузки).

Эту информацию можно найти в документе MSDS (Material Safety Data Sheet) для каждого конкретного груза.

2. *Первичная мойка.* Первичная мойка предназначена для удаления видимых остатков груза. К сожалению, очень часто происходят случаи, когда неверно выбранная 20-ти минутная первичная мойка приводит к продолжительным простоям судна и огромным финансовым затратам. Для большинства химических грузов – использование обычной забортной холодной воды является единственно приемлемым способом мойки танков. Кроме того, не рекомендуется при проведении первичной мойки использовать какие либо добавки или моющую химию. Однако для некоторых химических грузов, таких как изоцианиды, присутствие воды вообще недопустимо, так как, вследствие реакции с водой, выделяются токсичные или взрывоопасные газы, или образуются новые вещества, которые вызывают разрушение покрытия танков и даже их конструкции. Более того, присутствие в танке даже не воды, а влажного воздуха, вызывает мгновенное затвердевание остатков груза, при этом образуется настолько твердый состав, что удалить его из танка обычным способом практически невозможно. В этом случае рекомендуется использовать хлорсодержащие растворители (рециркуляция с последующей сдачей смывок на берег, но только не в танках с эпоксидным покрытием).

3. *Основная мойка танков.* Основная мойка танков осуществляется следующими способами:

1. Растворение остатков груза.
2. Омыление.
3. Эмульгирование.
4. Пропарка.

1. Растворение.

Все грузы, перевозимые на химовозах можно разделить на два больших класса:

а) нерастворимые в воде (для растворения таких грузов наиболее часто применяются органические растворители, такие как Толуол, Ацетон, Кетоны, Уайт спирит, Парафины, Хлорсодержащие растворители (метилен хлорид, трихлорэтилен, тетра хлорэтил));

б) растворимые в воде (при мойке этих грузов чаще всего используются растворители на водной основе: растворы кислот, солей, щелочей, мыльные растворы, детергенты).

2. Омыление (Saponification).

Растительные и животные жиры и масла легче всего подвергаются омылению при использовании слабых растворов щелочей, таких как едкий натр (Caustic Soda) или едкий калий (Caustic Potash). Образовавшееся на переборках танка мыло и глицерин, легко удаляются забортной водой.

### 3. Эмульгирование (Emulsification).

Если в растворителе рассеивается жидкость, молекула которой больше молекулы самого растворителя, образуется эмульсия. Иными словами, мойка танка таким способом – это перенос остатков груза с поверхности танка в рассеянном (эмульгированном) состоянии в мочную воду. Для удаления пленки груза с поверхности танка, её необходимо отделить от поверхности, удерживая во взвешенном состоянии, и предотвратить повторное прилипание к поверхности.

### 4. Пропарка.

Пропаривание танка можно производить как чистым паром, так и с использованием различных химических добавок (например, для удаления запаха предыдущего груза при пропаривании используются различные дезодораторы). Пропаривание танка, в атмосфере которого присутствуют воспламеняющиеся пары, категорически запрещено, из-за опасности возникновения электростатического разряда.

Одной из наиболее острых проблем при мойке танков является вопрос утилизации смывок. Для разрешения этой задачи следует руководствоваться Приложением II МАРПОЛа [6], где указано, что смывки после мочных операций разрешено откачивать за борт, если судно находится не в специальном районе (Антарктика) при таких условиях:

1. Судно следует постоянным курсом со скоростью не менее 7 узлов;
2. Сброс происходит через специальное отверстие ниже ватерлинии;
3. Кратчайшее расстояние до берега не превышает 12 миль и глубина, указанная на карте (а не глубина под килем) – не менее 25 м.

При планировании мочных операций очень важно учитывать не только физические и химические свойства груза, но и покрытие танков на данном типе судна, так как не каждый способ мойки и не каждая химия подходит для мойки того или иного типа покрытия. На сегодняшний день самыми распространенными видами танкового покрытия являются:

- нержавеющая сталь (либо судостроительная сталь, плакированная 2-3 мм слоем нержавеющей стали обычно марки S-316);
- эпоксидное покрытие;
- цинковое покрытие.

Информация о совместимой химии с данным типом покрытия содержится в Tank Coating Resistance List (Листе устойчивости покрытия танка к воздействию различных веществ).

Существуют следующие методы нанесения мочной химии на поверхность танка:

- Распыление мочной химии вручную.
- Рециркуляция.
- Инжекция в мочную воду.
- Протирание загрязненных участков поверхности танка.

**4. Вентиляция.** Конечным этапом подготовки танков является вентиляция и просушка. Осуществляется стационарными либо переносными воздухоподкачками, которые подают в танк сухой воздух с низкой температурой точки росы.

Следует обратить внимание, что остатки груза с высоким давлением паров (5 кПа при  $t$  20 °С и выше) могут быть удалены с танка только методом вентиляции, при условии соблюдения повышенных противопожарных мер. Информацию об этом можно найти в судовом документе “Руководство по методам и устройствам” При этом нужно помнить, что продукты с низким давлением паров и ингибированные грузы никогда не удаляются методом вентиляции.

**5. Инспекция танка.** Осуществляется только при непрерывной подаче воздуха в танк, с соблюдением всех мер предосторожности и техники безопасности. Существуют такие основные способы проверки танков:

- визуальная инспекция на отсутствие следов и запаха предыдущего груза, пыли и других видимых посторонних частиц на поверхности танка а также свободной воды или конденсата, отсутствие изменения цвета покрытия танка вследствие перевозки груза или мойки, отсутствие участков танка со вздутиями (Blisters), под которыми может находиться предыдущий груз, и участков с испорченным покрытием, отсутствие налета на змеевиках обогрева и грузовом насосе, отсутствие запаха уплотнения закрытий;

- стандарт подготовки танков под груз, в составе которых не допускается вообще (или допускается в очень ограниченном количестве) присутствие различных примесей.

Помимо визуальной проверки включает в себя отбор смывок с внутренней поверхности танков и проведения ряда анализов, таких как: анализ на свободные углеводороды, на свободные хлориды, РТТ Test (Permanganate Time Test). **РТТ Test (Permanganate Time Test)** – тест на присутствие кислородосодержащих соединений, способных вызвать окисление груза).

**Выводы.** Подводя итог, хочется еще раз отметить, что план мочных операций с учетом всех особенностей перевозки должен быть четко спланирован заблаговременно. Любая ошибка либо оплошность может привести к катастрофическим последствиям, как в финансовом, так и в экологическом плане. Так, например, помыв горячей водой танк из-под соевого, подсолнечного, льняного, а также масла грецкого ореха, мы рискуем получить полимерную пленку на стенках, которую практически невозможно удалить в судовых условиях. В этом случае, предварительную мойку следует проводить только холодной водой, как можно скорее после выгрузки. Оливковое же, пальмовое, кокосовое, касторовое, арахисовое, рапсовое, камфорное масло – наоборот, ни в коем случае нельзя удалять с помощью холодной воды. Вода должна быть на 10-15 °С выше температуры плавления. Все дело в йодном числе. В первом случае оно превышает

ет 130, во втором – менее 115. Исходя из этого, применяются кардинально отличающиеся друг от друга способы мойки.

Итак, правильно разработанный, заранее подготовленный план моечных операций, с учетом химических и физических свойств груза, особенностей покрытия данного типа танка и требований к подготовке танков под следующий груз, поможет сэкономить средства судовладельца, а также время и трудозатраты экипажа.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *www.chemicaltankerguide.com*
2. *www.tankcleaning.de*
3. *Miracle Tank Cleaning Guide, ChemServe GmbH, Germany, 2012, – 1091 p.*
4. *Dr. Verwey's Tank Cleaning Guide, 8th edition, Chemical Laboratories, Rotterdam, 2011, – 454 p.*
5. *Баскаков С.П. Подготовка грузовых танков на химовозах. – СПб.: ГМА им. адмирала С.О. Макарова, 2004. – 182 с.*
6. *MARPOL – 73/78 (consolidated edition), IMO, London, 2011. – 488 p.*
7. *IBC Code, IMO, London, 2007. – 168 p.*
8. *SOLAS (consolidated edition), 5<sup>th</sup> Edition, IMO, London, 2009. – 566 p.*
9. *Tanker Safety Guide (Chemicals), 3<sup>rd</sup> Edition, ICS, London, 1985. – 207 p.*
10. *Chemical Data Guide for Bulk Shipment by Water (Condensed CHRIS), U.S. Coast Guard, ProStar Publications, Edition 1990. – 420 p.*

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2013*

**Рецензент** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету **Ю.М. Ларкин**

УДК 630.36

В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко

**КОНЦЕПЦИЯ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РИСКА  
СУДОВОЙ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*Предложен концептуальный подход для анализа и оценки риска судовой сложной технической системы, функционирующей в условиях малопредсказуемых внешних воздействий, внутренних поражающих факторов и экстремальных аварийных ситуациях.*

**Ключевые слова:** сложная техническая система, оценка риска, работоспособность, вероятность, ущерб.

*This paper proposes a conceptual approach to analyze and evaluate the risk of the ship's complex technical system functioning the face of unpredictable external factors, internal factors affecting and extreme emergencies.*

**Keywords:** complex technical system, risk assessment, performance, the probability of the damage.

**Введение.** К сложным техническим системам (СТС) относятся технические объекты, обладающие иерархически организованной во времени или пространстве структурой из разнообразных элементов и подсистем. Современная судовая сложная техническая система – комплекс СТС, состоящий из различных взаимосвязанных технических систем – специализированных трубопроводов, механизмов, агрегатов, устройств, предназначенных для обеспечения эксплуатации и условий обитаемости судна.

Управление техническим состоянием судовых СТС в процессе эксплуатации требует достоверной оценки их технического состояния. При этом задача определения технического состояния сводится к определению надежности СТС, анализу риска, оценке вероятности безотказного функционирования и т.д. [1-5]. Оценка риска СТС заключается в определении для нее величины (меры) риска [6, 7]. Основательная и точная оценка риска может быть получена при использовании современных расчетных методов научного прогнозирования, опирающихся на теорию катастроф, теорию безопасности, теорию надежности сложных технических систем и другие фундаментальные теории, а также современные информационные технологии.

**Актуальность.** В процессе эксплуатации судовых СТС надежность рассчитывают на основе статистических данных с учетом режимов, условий использования и восстановления их агрегатов. Вероятностный расчет надежности СТС сопряжен с существенными теоретическими и вычислительными сложностями и представляет собой многоступенчатую оценку различных взаимосвязанных между собой величин.

С анализом риска тесно связан процесс оценки риска СТС. Результаты оценки риска могут быть выражены как качественно, так и количественно. Установленные опасности оцениваются с целью выделения опасностей с неприемлемым уровнем риска и служат основой для разработки рекомендаций и принятия мер по их уменьшению.

Существуют различные подходы к оценке риска. Первый – инженерный, опирающийся на статистику реализовавшихся опасностей и на вероятностный анализ безопасности. Второй подход – модельный. В настоящее время известны результаты как теоретических изысканий в области теории надежности, так и практического применения различных моделей надежности для технических и технологических устройств, их агрегатов в различных отраслях промышленности [6-9]. Перспективными направлениями в области проектирования и эксплуатации сложных технических систем является моделирование условий эксплуатации с учетом специфики функционирования сложных систем. Модели должны позволять оценивать воздействия на СТС, как в ходе работы систем в штатном режиме, так и при возникновении в них аварийных ситуаций. Оба подхода основаны на расчетах. Однако, для таких расчетов не всегда хватает достоверных исходных данных.

Таким образом, для планирования компромисса между надежностью судовых СТС и их качественными характеристиками (стоимость, производительность, функциональность, масштабируемость, совместимость и т.д.) необходимо использовать новые подходы при анализе и оценке риска систем.

**Целью работы** является разработка концептуального подхода для анализа и оценки риска судовой сложной технической системы.

**Изложение основного материала.** Эффективность работы СТС зависит от надежности ее агрегатов и межагрегатных связей (МС), от специфики взаимовлияния агрегатов посредством МС.

Комплексный показатель надежности элементов СТС – технический риск, представляющий собой комбинацию вероятностей ( $P_{wi}$ ) возникновения опасностей определенного класса (аварии, катастрофы и т.д.) из-за технического несовершенства, нарушения правил эксплуатации технических систем и размеров возможных ущербов ( $V_i$ ) от нежелательных событий.

В качестве критериев концепции анализа и оценки влияния агрегата, МС на общую оценку рисков СТС рекомендуется использовать понятия угроз и рисков. Угроза – безразмерная немасштабная оценка «важности», «уязвимости» агрегата, МС с точки зрения оценки рисков структуры системы в целом.

При анализе риска СТС должна учитываться ее структура (иерархия и топология системы), функциональное состояние (работоспособность, исправность) ее агрегатов, а также межагрегатные связи (структура, топология, состав контекстных систем «обвязки»).

Оценка рисков СТС включает структурные и функциональные ее аспекты. Структурные аспекты оценки рисков СТС учитывают угрозы и риски, возникающие при взаимодействии агрегатов, МС в иерархии и топологии системы. Функциональные аспекты оценки рисков СТС учитывают угрозы и риски с точки зрения функционального состояния агрегатов, МС системы.

На СТС оказывает воздействие множество факторов, которые можно разделить на внешние и внутренние. К внешним воздействиям на агрегаты СТС и ее МС относятся различные воздействия со стороны внешней среды, характеризующиеся неопределенностью и трудной прогнозируемостью. К внутренним воздействиям относятся результаты влияния различных типов носителя (энергии, вещества, информации) между агрегатами СТС. При внешних или внутренних воздействиях на отдельные агрегаты или МС СТС, достигающих критических значений (выше нормативно установленных эксплуатационных значений), уменьшается эффективность функционирования агрегатов и всей СТС.

Концепция анализа и оценки рисков СТС, их агрегатов и МС в условиях малопредсказуемых внешних воздействий, внутренних поражающих факторов и экстремальных аварийных ситуациях основываются на объединении разнородных СТС в единую модель. Такая модель призвана обеспечить оценку рисков СТС, их агрегатов и МС с точки зрения значимости и критичности для функционирования всей системы в целом. При подобном подходе возможно масштабирование, выявление структурных и функциональных угроз, уязвимых мест в СТС.

Для оценки риска и математического описания различных по природе, назначению и принципу функционирования судовых СТС в условиях малопредсказуемых внешних воздействий, внутренних поражающих факторов и экстремальных аварийных ситуациях рекомендуется использовать математические модели, опирающиеся на теорию графов [8]. Для моделирования СТС используется ее представление когнитивной имитационной моделью (КИМ) в виде ориентированного графа, отражающего взаимодействие агрегатов и МС. Ориентированный граф СТС  $G(V, A)$  с  $n$  вершинами (узлами) и  $m$  дугами (ориентированными ребрами). Множество вершин графа  $V = \{v_i, i = 1, n\}$ . Множество (упорядоченных) пар вершин  $v, w$ , называемых дугами (ориентированными ребрами) графа  $A = \{a_j\} = \{(v_i, w_j)\}, j = 1, m$ , вершину  $v$  называют началом, а  $w$  – концом дуги. Величина надежности агрегата СТС, соответствующего вершине  $v_i$  определяется  $v_i(t) = P_{v_i}(t \leq T)$ .

Если можно выделить конструктивные или функциональные агрегаты СТС, вершины графа соответствуют структурным агрегатам системы, ребра графа – МС. Если выделить агрегаты затруднительно – вершины графа соответствуют параметрам системы, а ребра графа – причинно-следственным связям между параметрами. В каждый узел может входить

или из узла может выходить несколько ребер. В этом случае говорят о множестве ребер, инцидентных данному узлу графа. Каждому ребру инцидентны два узла, расположенные на его концах.

Качественное отражение состояния агрегатов и МС СТС выражается функционалом зависимости между состоянием агрегатов или МС, а также определенным типом нагрузки внешних или внутренних воздействий.

Для оценки рисков СТС необходимо установить степень влияния изменений внешних и внутренних воздействий на агрегаты и МС системы. Для этого в КИМ используются поражающие моделирующие импульсы (ПМИ)  $-1 - \text{imp}_k(t), k \in \{1, 2, 3, \dots, l\}$  со значением амплитуды ПМИ  $m_{\text{imp}}(t)$  в дискретные моменты времени  $t = 0, 1, 2, 3, \dots, l$ .

Степень поражения агрегатов (вершин) и межагрегатных связей (ребер) СТС определяется их коэффициентами степени поражения

$$K_{c.n.} = \frac{w(t+1)}{w(t) \cdot (1 - m_{\text{imp}}(t))},$$

где  $w(t+1)$  – значение веса элемента (вершины или ребра) орграфа в момент времени  $t+1$ ;

$w(t)$  – значение веса элемента (вершины или ребра) орграфа в момент времени  $t$ .

Изменение амплитуды ПМИ при прохождении через вершины или дуги графа КИМ СТС характеризуется передаточным коэффициентом

$$H_m = \frac{m_{\text{imp}}(t+1)}{m_{\text{imp}}(t)},$$

где  $m_{\text{imp}}(t+1)$  – значение амплитуды ПМИ в момент времени  $t+1$ .

Для оценки фактической функциональной работоспособности СТС используется нормирующее воздействие на агрегаты и МС КИМ СТС.

Последовательность оценки риска СТС включает этапы:

– оценка вероятности выхода из строя вершины (ребра) КИМ СТС;

– оценка структурного и функционального ущерба от пораженной вершины (ребра) КИМ СТС;

– оценка риска пораженной вершины (ребра) КИМ СТС.

Оценка вероятности выхода из строя вершины (ребра) КИМ СТС определяется на основе Байесовского метода анализа СТС [9]

$$P(C|D) = \frac{P(D|C) \cdot P(C)}{P(D)},$$

где  $P(C)$  – априорная вероятность гипотезы  $C$  выхода из строя вершины (ребра);

$P(C|D)$  – вероятность гипотезы  $C$  при наступлении события  $D$  (апостериорная вероятность);

$P(D|C)$  – вероятность наступления события  $D$  при истинности гипотезы  $C$ ;

$P(D)$  – полная вероятность наступления события  $D$ .

Количественная оценка структурного ущерба от пораженной вершины (ребра) КИМ СТС определяется по ущербу при нарушении связности топологических структур СТС как отношение пораженных агрегатов (МС) к общему числу агрегатов (МС) СТС при единичном поражении агрегата (МС) и беспрепятственном распространении ПМИ по СТС.

Количественная оценка функционального ущерба от пораженной вершины (ребра) КИМ СТС определяется по ущербу при нарушении функционирования агрегатов (МС) как отношение работоспособности СТС при ее частичной утрате агрегатом (МС) к номинальной работоспособности СТС.

Оценка риска пораженной вершины (ребра) КИМ СТС определяется произведением значений вероятностей выхода из строя вершины (ребра) КИМ СТС и соответствующих оценок структурного и функционального ущербов пораженных вершин (ребер) орграфа.

Оценка риска при структурном ущербе от пораженной  $i$ -й вершины КИМ СТС

$$R_{svi} = k_{svi} \cdot p_{vi}(t),$$

где  $k_{svi}$  – оценка структурного ущерба от пораженной  $i$ -й вершины КИМ СТС;

$p_{vi}(t)$  – вероятность выхода из строя пораженной  $i$ -й вершины КИМ СТС.

Оценка риска при структурном ущербе от пораженного  $j$ -го ребра КИМ

$$R_{saj} = k_{saj} p_{aj}(t),$$

где  $k_{saj}$  – оценка структурного ущерба от пораженного  $j$ -го ребра КИМ СТС;

$p_{aj}(t)$  – вероятность выхода из строя пораженного  $j$ -го ребра КИМ СТС.

Оценка риска при функциональном ущербе от пораженной  $i$ -й вершины КИМ СТС

$$R_{fvi} = k_{fvi} \cdot P_{vi}(t),$$

где  $k_{fvi}$  – оценка функционального ущерба от пораженной  $i$ -й вершины КИМ СТС.

Коэффициент риска при функциональном ущербе от пораженного  $j$ -го ребра КИМ СТС

$$R_{faj} = k_{faj} \cdot P_{aj}(t),$$

где  $k_{faj}$  – оценка функционального ущерба от пораженного  $j$ -го ребра КИМ СТС.

Полученные результаты разработки концептуального подхода для анализа и оценки риска судовой сложной технической системы позволят создать методические основы оценки риска СТС, функционирующих в условиях малопредсказуемых внешних воздействий, внутренних поражающих факторах и экстремальных аварийных ситуациях.

**Выводы.** Концепция оценки рисков СТС, их агрегатов и меж-агрегатных связей в условиях малопредсказуемых внешних воздействий, внутренних поражающих факторах и экстремальных аварийных ситуациях учитывает вероятности поражения агрегатов и МС, а также ущерб от их поражения. Концепция оценки риска СТС, их агрегатов и меж-агрегатных связей базируется на оценках, полученных при минимальном участии обслуживающего СТС персонала.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бусленко Н.П. К теории сложных систем [Текст] / Н.П. Бусленко // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1963. – № 5.
2. Коваленко И.Н. О некоторых классах сложных систем [Текст] / И.Н. Коваленко // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1964. – № 6.
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
4. Гуськов А.В. Надежность технических систем и техногенный риск [Текст] / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2007. – 427 с.
5. Острейковский В.А. Теория надежности [Текст] / В.А. Острейковский. – М.: Высш.шк., 2003. – 463 с.

6. Биргер И. А. *Техническая диагностика [Текст] / И.А. Биргер.* – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
7. ИСО/МЭК 31010:2009 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» (ISO/IEC 31010:2009 «Risk management – Risk assessment techniques»). – М.: Стандартиформ, 2012. – 70 с.
8. Райнишке К. *Оценка надежности систем с использованием графов [Текст] / К. Райнишке, И.А. Ушаков.* – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
9. Калман Р. *Очерки по математической теории систем [Текст]/ Р. Калман, П. Фалб, М. Арbib.* – М., 1971.

*Стаття надійшла до редакції 21.10.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електротехніка та електрообладнання суден» Одеського національного морського університету **В.О. Яровенко**

УДК 629.12

И.А. Демешкан, А.А. Голиков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ  
В ПРОЦЕССЕ МОЙКИ ТАНКОВ**

*Статья посвящена проблемам экологической безопасности при проведении процесса мойки танков на борту химовоза. Основное внимание акцентируется на особенностях данного процесса с учетом конструктивных отличий судов, классификации груза по категориям и основных международных требований по охране окружающей среды.*

**Ключевые слова:** мойка танков химовозов, экология, экологическая безопасность, требования МАРПОЛ 73/78, смывки.

*Стаття присвячена проблемам екологічної безпеки при проведенні процесу миття танків на борту хімовоза. Основна увага акцентується на особливостях даного процесу з урахуванням конструкційних відмінностей суден, класифікації вантажу за категоріями та основних міжнародних вимог щодо охорони навколишнього середовища.*

**Ключові слова:** мийка танків хімовозів, екологія, екологічна безпека, вимоги МАРПОЛ 73/78, смивки.

*This article is dedicated to the problems of ecological safety during the tank cleaning process on board the chemical tanker. The main attention is focused on features of this process, taking into account the structural differences of vessels, cargo classification by categories and the main international requirements for the protection of the environment.*

**Keywords:** tank washing of a chemical tankers, ecology, ecological safety, requirements of MARPOL 73/78, wash and prewash.

**Рассматриваемая проблема.** В условиях современной глобализации, проблемы экологической безопасности выходят на первый план. Это непосредственно касается перевозки жидких наливных грузов танкерами-химовозами, и, в частности, рассматривается проблема мойки танков, используемые при этом химические вещества, и вопрос утилизации смывок.

**Анализ публикаций.** Проблема загрязнения окружающей среды вредными и токсичными жидкими веществами, в результате их транспортировки танкерами-химовозами, широко рассматривается в Приложении II к конвенции МАРПОЛ 73/78 [1], а также в OPA-90 [2], VGP [3], SMPEP (Shipboard Marine Pollution Emergency Plan for Noxious Liquid Substances – Судовом плане чрезвычайных мер по борьбе с загрязнением моря вредными жидкими веществами) для конкретного судна. Конструкционные требования для каждого типа химовозов изложены в кодексе IBC code [4].

**Цель.** Исследование и анализ негативных факторов влияния на окружающую среду, связанных с использованием химических средств для мойки танков, и их утилизацией.

**Изложение материалов исследования.** Наливные грузы, давление насыщенных паров которых ниже 2,8 бар (280 кПа) при температуре +37,8 °C (= 100 °F), перевозятся танкерами-химовозами. Согласно кодексу IBC code [4], все химические танкеры подразделяются на три типа. Для первого типа характерны наличие двойных бортов и двойного дна, при этом, расстояние от борта до грузового танка составляет 11,5 м, либо равное ширине судна, деленной на пять (в зависимости от того, что меньше). Высота танков двойного дна – 6 м, либо равная ширине судна, деленной на пятнадцать (в зависимости от того, что меньше). Химовозы первого типа предназначены для перевозки всех наливных грузов практически без исключений, включая самые опасные по токсическому воздействию, а также грузы с температурой воспламенения менее 65 °C.

Второй тип химических танкеров также характеризуется наличием двойных бортов и дна, но расстояние от борта до танка составляет не менее 760 мм; высота же танков двойного дна, как и у химовоза первой категории, составляет 6 м, либо равная ширине судна, деленной на пятнадцать. Данный тип химических танкеров имеет уже некоторые ограничения в списке допустимых к перевозке грузов, однако все еще используется для транспортировки веществ, представляющих серьезные угрозы. Информацию, связанную с грузами, разрешенными к перевозке на данном типе танкера-химовоза можно найти на борту судна в документе “Certificate of Fitness” (Certificate of Fitness for the Carriage of Dangerous Chemicals in Bulk – Свидетельство о пригодности судна для перевозки опасных химических грузов наливом.)

Третий тип не имеет каких-либо специальных конструкционных требований.

Согласно Приложению II к МАРПОЛ 73/78 [1], все химические грузы, перевозимые наливом, подразделяются на четыре категории в зависимости от степени вредного влияния на живые организмы и окружающую среду: X (наиболее опасные), Y (представляют некоторую опасность), Z (представляют небольшую опасность), OS (другие вещества). Также вещества могут быть высоковязкими и/или затвердевающими. Сразу после выгрузки химического груза, на судне происходит процедура зачистки. Количество остатков груза, допустимое к содержанию в танках (трубопроводах, арматуре грузовой системы) после выгрузки приведено ниже в таблице.

После того, как зачистка завершена, определяют, необходима ли предварительная мойка. Предварительную мойку танков (“привош”) с обязательной сдачей смывок в береговые приемники осуществляют для всех грузов категории X, а также для высоковязких и/либо затвердевающих грузов категории Y. Эта процедура производится в соответствии с судовым “Руководстве по методам и устройствам”, но также следует учи-

тывать, что моечная машинка танка, предварительная мойка которого осуществляется из-под груза категории X, должна быть настроена таким образом, чтобы в процессе мойки охватывались все его поверхности. Для грузов Y-категории достаточно одной поверхности. Если, по каким-либо причинам, эти условия не могут быть выполнены, следует произвести данную процедуру три раза.

*Таблица*

*Требования для химовозов  
относительно зачистки танков после выгрузки*

Данные о судне	Минимальный остаток груза		
	танки, сертифицированные для перевозки грузов категории «X»	танки, сертифицированные для перевозки грузов категории «Y»	танки, сертифицированные для перевозки грузов категории «Z»
Новые суда (киль заложен после 1 января 2007 г.)	75л	75л	75л
Суда, построенные до 1 января 2007 г.	100л + 50л	100л + 50л	300л + 50л
Суда, построенные до 1 июля 1986 г.	300л + 50л	300л + 50л	900л + 50л

Под циклом моечной машинки следует понимать период между двумя идентичными последовательными оборотами машинки на 360 °. Минимальное количество циклов для затвердевающих грузов категории X – два; для незатвердевающих – один, также как и для затвердевающих грузов категории Y, а для незатвердевающих грузов категории Y – достаточно всего половины цикла.

Минимальное количество воды, необходимое для осуществления предварительной мойки определяется по следующей формуле:

$$Q = k(15r^{0.8} + 5r^{0.7} \times V/1000),$$

где Q – требуемое минимальное количество воды, м<sup>3</sup>;

r – количество остатка груза в танке (определяется по данным из “Руководства по методам и устройствам”, но не может быть менее 0,100 м<sup>3</sup> для танка объемом 500 м<sup>3</sup>, и более 0,040 м<sup>3</sup> для танка объемом 100 м<sup>3</sup> и меньше. Для танков, размером от 100 м<sup>3</sup> до 500 м<sup>3</sup>, минимальное значение r определяется методом линейной интерполяции);

V – объем грузового танка, м<sup>3</sup>;

К – фактор, принимающий следующие значения:

- для незатвердевающих, маловязких грузов категории X,  $k = 1,2$ ;
- для затвердевающих, высоковязких грузов категории X,  $k = 2,4$ ;
- для незатвердевающих, маловязких грузов категории Y,  $k = 0,5$ ;
- для незатвердевающих или высоковязких грузов категории Y,  $k = 1,0$ .

Предварительная мойка грузов категории X производится до тех пор, пока анализ проб, взятых с танка сюрвейером, не покажет, что количество груза в моечной воде не превышает 0,1 %. После того, как требуемая концентрация достигнута, танк продолжают мыть с непрерывной сдачей на берег смывок, до тех пор, пока он не станет пустым.

Нередко во время предварительной мойки, для усиления чистящего эффекта, в воду добавляется моечная химия: минеральные масла, хлорсодержащие растворители. В этом случае, эти вещества должны рассматриваться как груз, и их последующая выгрузка регламентируется Приложением I либо Приложением II к МАРПОЛ 73/78. [1]. Не допускаются к использованию чистящие добавки, содержащие компоненты категории X. Исключение составляют лишь вещества, которые могут быть разрушены естественными факторами (почвенными бактериями, растениями, животными), если они составляют не более 10 % чистящего вещества по объему.

После того, как выполнена обязательная предварительная мойка, смывки сданы на берег и анализы удовлетворяют требованиям, судно может отходить от причала и последующую мойку производить в море, откачивая смывки за борт, при таких условиях: судно следует постоянным курсом со скоростью не менее 7 узлов; сброс происходит через специальное отверстие ниже ватерлинии; расстояние до ближайшего берега – не меньше 12 миль и глубина, указанная на карте, составляет не менее 25 м; судно не должно находиться в «специальном районе» (например, Антарктика, ниже 60 °S).

Водяной балласт, принятый в предварительно вымытый грузовой танк, если концентрация предыдущего груза не превышает 1 ppm, может быть откатан за борт без соблюдения вышеуказанных условий, кроме требования о минимальном расстоянии до ближайшего берега в 12 миль и глубины на карте – 25 м.

**Выводы.** В ходе исследования были рассмотрены основные факторы, влияющие на экологическую безопасность, связанные с эксплуатацией химических танкеров. Строгое соблюдение всех вышеперечисленных требований судовым персоналом танкеров-химовозов во время перевозки, грузовых и моечных операций позволит избежать нанесения вреда окружающей среде. Большую роль в этом процессе играет правильно поставленная система менеджмента качества и постоянная работа с экипажами судов и техническими специалистами судоходных компаний.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *MARPOL – 73/78 (consolidated edition)*. – IMO. – London. – 2011. – 488 p.
2. *Oil Pollution Act of 1990 [As Amended Through P.L. 106-580, Dec. 29, 2000]*
3. *Vessel General Permit for Discharges Incidental to the Normal Operation of the Vessel (VGP), Version 2/5/2009, United States Environmental Protection Agency (EPA), National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES), 2009*. – 158 p.
4. *IBC Code, IMO*. – London. – 2007. – 168 p.
5. *SOLAS (consolidated edition), 5<sup>th</sup> Edition*. – IMO. – London. – 2009. – 566 p.
6. *Tanker Safety Guide (Chemicals), 3rd Edition*. – ICS. – London, 1985. – 207 p.
7. *Chemical Data Guide for Bulk Shipment by Water (Condensed CHRIS), U.S. Coast Guard, ProStar Publications*. – 1990. – 420 p.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2013

**Рецензент** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету **Ю.М. Ларкин**

УДК 008.5

С.В. Руденко, Ма Фен

**АСПЕКТЫ ПРАКТИКИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА  
ФОРМИРОВАНИЯ ИМИДЖА УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ**

*Разработана марковская модель отображения имиджа учебных заведений в виде распределения целевого контингента населения по соответствующим уровням восприятия имиджа. Применение предложенной модели позволяет перейти к многомерным оценкам в практике реализации проектов формирования имиджа.*

**Ключевые слова:** проекты, имидж, состояния, марковская цепь, оценка, система, управление.

*Розроблена марківська модель відображення іміджу навчальних закладів у вигляді розподілу цільового контингенту населення за відповідними рівнями сприйняття іміджу. Застосування запропонованої моделі дозволяє перейти до багатовимірних оцінок в практиці реалізації проектів формування іміджу.*

**Ключові слова:** проекти, імідж, стани, марківський ланцюг, оцінка, система, управління.

*Developed a Markov model of the display image of the schools in the form of distribution of target population on appropriate levels of perception of image. The application of this model allows us to go to a multidimensional assessment in practice, the implementation of projects of image formation.*

**Keywords:** projects, image, state Markov chain, evaluation, system, management.

**Постановка проблемы в общем виде.** При практическом внедрении системы управления имиджем учебного заведения (на примере деятельности колледжа Цинь) были выявлены основные противоречия этой работы, которые состоят в следующем:

– результат работы по формированию имиджа определяется во внешней среде, а не локализован в пределах учебного заведения;

– система, которую образуют учебное заведение и внешняя среда является слабо структурированной – в ней существует множество связей, нормативов, конституциональных особенностей, общественных правил, обычаев и традиций, учесть которые в полном объеме достаточно сложно;

– практически невозможно получить обратную связь, для того чтобы оценить эффективность мероприятий, которые нацелены на формирование имиджа учебного заведения;

– необходимо преодолевать сопротивление преподавателей колледжа по проведению имиджевых мероприятий, так как они полагают, что эта деятельность идет в разрез с политикой Партии и Правительства Китая – «не следует выделяться в общей структуре колледжей, поскольку это создаст перекося в наборе абитуриентов в других учебных заведениях, которые не смогу выполнить план приема»;

– существенная неопределенность возникает из-за сложности выделения целевого контингента – на кого следует направлять коммуникационные и информационные мероприятия.

Указанные объективные и субъективные факторы формируют поле интересов и противоречий, которые необходимо учесть при проведении работы по формированию и управлению имиджем учебного заведения. При этом на начальном этапе внедрения применялась модель марковской цепи, разработанная в работе [1].

**Цель статьи.** Выполнить оценку результатов внедрения проекта управления имиджем учебного заведения как однородного марковского процесса с дискретными состояниями и временем для многомерного представления распределения целевого контингента населения по соответствующим уровням восприятия имиджа.

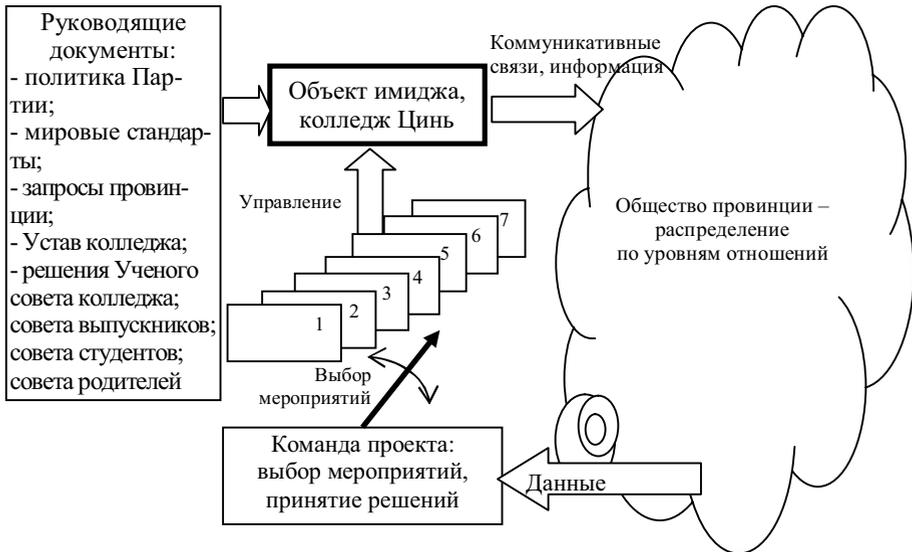
**Анализ публикаций по применению цепей Маркова для оценки состояний проектов.** Множество коммуникаций и причин в слабо структурированных системах изменяют их состояния во времени в зависимости от структуры и факторов внутреннего и внешнего окружения. Ход проектов в такой многофакторной системе часто удается представить только в форме качественных моделей [2-7]. Вместе с тем, применение цепей Маркова позволяет перейти к количественным оценкам хода и результатов проектов [8-14].

Известные применения цепей Маркова можно отнести к двум разным классам в зависимости от свойств отображаемой системы. В первом случае состояния отображаемой системы рассматриваются как процессы проекта [8-10]. Иной тип систем связан с распределением некоторого множества по заданным состояниям [11-15]. Построенные на основе цепей Маркова модели систем имеют различие только в отображении структуры и в способах определения переходных вероятностей [8, 11, 13]. При моделировании сложных систем ключевым является отображение структуры системы с помощью ориентированного взвешенного графа, в котором [15]:

- вершины соответствуют состояниям проекта;
- непосредственные связи между состояниями отображают причинно-следственные цепочки, по которым распространяются влияния некоторого фактора на другие факторы.

Цепи Маркова отображают случайный процесс, удовлетворяющий свойству Маркова и принимающий конечное или счетное число значений (состояний). Существуют цепи Маркова, как с дискретным, так и с непрерывным временем.

**Характеристика системы.** Принципиальная схема управления имиджем колледжа включает в себя следующие элементы: объект имиджа (колледж Информатики и компьютерных технологий, округ Цинь, ректор д-р, профессор Чжао Лу); комплекс Руководящих документов; общество провинции; команда проекта и методики выработки типа мероприятий для информирования населения провинции о колледже (рис. 1).



*Рис. 1. Принципиальная схема управления имиджем*

Колледж Информатики и компьютерных технологий (округ Цинь) расположен в промышленном районе. Общее число студентов – 7200 чел. Контингент преподавателей – 420 чел. Выпускники колледжа частично продолжают обучение в университетах Китая и за рубежом (около 10 %). Основные места работы выпускников колледжа: промышленность, банковский сектор, транспорт, сфера услуг, учебные заведения.

**Разработка модели системы.** В марковских моделях существует зависимость случайного процесса изменения совокупности состояний  $S_k = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}_k$  от времени  $t [0, T]$ , где  $k$  – номер шага, а  $i$  – число состояний. «Марковость» имиджевых проектов подтверждается тем, что в них и в марковских цепях возможны изменения вероятностей состояний системы по шагам  $k$ , имеет место сходство топологической структуры переходов [13]. Существуют вероятности переходов  $\pi_{ij}$  в другие состояния, а сумма переходных вероятностей за один шаг из некоторого состояния равна единице [8-13]

$$\sum_{j=1}^m \pi_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Сумма вероятностей всех состояний  $p_i(k)$  на каждом шаге  $k$  [12]

$$\sum_{i=1}^m p_i(k) = 1,$$

где  $p_i(k)$  – вероятность состояния  $i$  на шаге  $k$ ;  
 $m$  – число дискретных состояний.

Под шагом понимается выполнение некоторого действия, которое переводит систему в новое состояние [13].

Вероятности состояний  $p_1(k), p_2(k), \dots, p_m(k)$  однородной цепи Маркова с дискретным временем характеризуют феноменологическое отображение системы – то, чем объект себя проявляет. Для любого шага  $k$  существуют также “вероятности задержки”  $\pi_{ii}$  системы в данном состоянии, которые дополняют до единицы сумму переходных вероятностей по всем переходам из данного состояния [11].

Для построения цепи Маркова необходимо построить ориентированный граф  $A = \{S, G\}$ , состоящий из упорядоченных пар вершин  $S$  и ориентированных дуг  $G$ , которые их соединяют. При этом состояния отвечают определенным вершинам графа [12]. Ребра определяют переходы из данных состояний, необходимые для управления проектом (рис. 2).

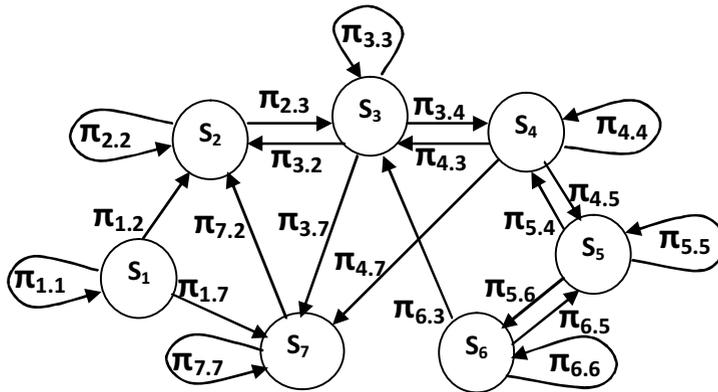


Рис. 2. Размеченный граф модели формирования и управления имиджем:

$S_1$  – неосведомленность;  $S_2$  – положительное отношение;  
 $S_3$  – доверие;  $S_4$  – высокие оценки;  $S_5$  – уверенный выбор;  
 $S_6$  – безразличие;  $S_7$  – неприятие

Матрица, включающая все переходные вероятности марковской цепи, приведенной на рис. 2, имеет вид

$$\|\pi_{i,j}\| = \begin{vmatrix} \pi_{1,1} & \pi_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{1,7} \\ 0 & \pi_{2,2} & \pi_{2,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi_{3,2} & \pi_{3,3} & \pi_{3,4} & 0 & 0 & \pi_{3,7} \\ 0 & 0 & \pi_{4,3} & \pi_{4,4} & \pi_{4,5} & 0 & \pi_{4,7} \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{5,4} & \pi_{5,5} & \pi_{5,6} & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{6,3} & 0 & \pi_{6,5} & \pi_{6,6} & 0 \\ 0 & \pi_{7,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{7,7} \end{vmatrix}.$$

На основе матрицы переходных вероятностей состояний, при условии, что начальное состояние системы известно, можно найти вероятности состояний  $p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)$  после любого  $k$ -го шага.

Примем, что в начальный момент система  $S$  находится в состоянии  $S_1$ , поэтому  $p_1(0) = 1$ . Остальные вероятности равны нулю

$$p_2(0) = 0; \quad p_3(0) = 0; \quad \dots \quad p_n(0) = 0.$$

За первый шаг система перейдет в одно из состояний с вероятностью  $\pi_{1,1}, \pi_{1,2}, \dots, \pi_{1,7}$ , что соответствует значениям первой строки матрицы переходных состояний  $\|\pi_{i,j}\|$  [12]

$$p_1(1) = \pi_{1,1}; \quad p_2(1) = \pi_{1,2}; \quad \dots \quad p_7(1) = \pi_{1,7}.$$

Найдем вероятности состояний после второго шага  $p_1(2), p_2(2), \dots, p_7(2)$ , исходя из предположения о том, что после первого шага система может быть в любом из состояний  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ . Вероятность этих состояний после первого шага определена выше, а условная вероятность перехода в  $S_i$  из любого состояния также известна и записана в матрице  $\|\pi_{i,j}\|$  переходных вероятностей. По формуле полной вероятности получим

$$\left. \begin{aligned} p_1(2) &= p_1(1) \cdot \pi_{1,1} + p_2(1) \cdot \pi_{2,1} + p_3(1) \cdot \pi_{3,1} + p_4(1) \cdot \pi_{4,1} + p_5(1) \cdot \pi_{5,1} + p_6(1) \cdot \pi_{6,1} + p_7(1) \cdot \pi_{7,1} \\ p_2(2) &= p_1(1) \cdot \pi_{1,2} + p_2(1) \cdot \pi_{2,2} + p_3(1) \cdot \pi_{3,2} + p_4(1) \cdot \pi_{4,2} + p_5(1) \cdot \pi_{5,2} + p_6(1) \cdot \pi_{6,2} + p_7(1) \cdot \pi_{7,2} \\ p_3(2) &= p_1(1) \cdot \pi_{1,3} + p_2(1) \cdot \pi_{2,3} + p_3(1) \cdot \pi_{3,3} + p_4(1) \cdot \pi_{4,3} + p_5(1) \cdot \pi_{5,3} + p_6(1) \cdot \pi_{6,3} + p_7(1) \cdot \pi_{7,3} \\ p_4(2) &= p_1(1) \cdot \pi_{1,4} + p_2(1) \cdot \pi_{2,4} + p_3(1) \cdot \pi_{3,4} + p_4(1) \cdot \pi_{4,4} + p_5(1) \cdot \pi_{5,4} + p_6(1) \cdot \pi_{6,4} + p_7(1) \cdot \pi_{7,4} \\ p_5(2) &= p_1(1) \cdot \pi_{1,5} + p_2(1) \cdot \pi_{2,5} + p_3(1) \cdot \pi_{3,5} + p_4(1) \cdot \pi_{4,5} + p_5(1) \cdot \pi_{5,5} + p_6(1) \cdot \pi_{6,5} + p_7(1) \cdot \pi_{7,5} \\ p_6(2) &= p_1(1) \cdot \pi_{1,6} + p_2(1) \cdot \pi_{2,6} + p_3(1) \cdot \pi_{3,6} + p_4(1) \cdot \pi_{4,6} + p_5(1) \cdot \pi_{5,6} + p_6(1) \cdot \pi_{6,6} + p_7(1) \cdot \pi_{7,6} \\ p_7(2) &= p_1(1) \cdot \pi_{1,7} + p_2(1) \cdot \pi_{2,7} + p_3(1) \cdot \pi_{3,7} + p_4(1) \cdot \pi_{4,7} + p_5(1) \cdot \pi_{5,7} + p_6(1) \cdot \pi_{6,7} + p_7(1) \cdot \pi_{7,7} \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, вероятность состояний после шага  $k = 2$  найдена. В компактном виде эту систему уравнений записывают так [11]

$$p_i(2) = \sum_{j=1}^n [p_j(1) \cdot \pi_{ji}] \Big|_{n=N}; \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $N$  – число вершин графа цепи Маркова, соответствующее количеству состояний.

Если вероятности состояний после второго шага известны, то применяя способ, который был использован для второго шага, можно найти вероятности состояний последующих шагов

Матрица условных переходных вероятностей для марковской цепи (рис. 2) будет иметь вид

$\pi_{1,1}$	$\pi_{1,2}$	0	0	0	0	$\pi_{1,7}$	0,5	0,4						0,1
0	$\pi_{2,2}$	$\pi_{2,3}$	0	0	0	0		0,7	0,3					
0	$\pi_{3,2}$	$\pi_{3,3}$	$\pi_{3,4}$	0	0	$\pi_{3,7}$	0,15	0,2	0,6					0,05
$\pi_{4,1}$	0	$\pi_{4,3}$	$\pi_{4,4}$	$\pi_{4,5}$	0	$\pi_{4,7}$		0,15	0,47	0,35				0,03
0	0	0	$\pi_{5,4}$	$\pi_{5,5}$	$\pi_{5,6}$	0			0,15	0,58	0,27			
0	0	$\pi_{6,3}$	0	$\pi_{6,5}$	$\pi_{6,6}$	0		0,03		0,20	0,77			
0	$\pi_{7,2}$	0	0	0	0	$\pi_{7,7}$	0,30							0,70

Переходные вероятности  $\pi_{i,j}$  определены экспертным методом.

Если начальное состояние системы известно, можно найти как показано выше все вероятности состояний  $p_1(k), p_2(k), \dots, p_7(k)$  после любого  $k$ -го шага (рис. 3).

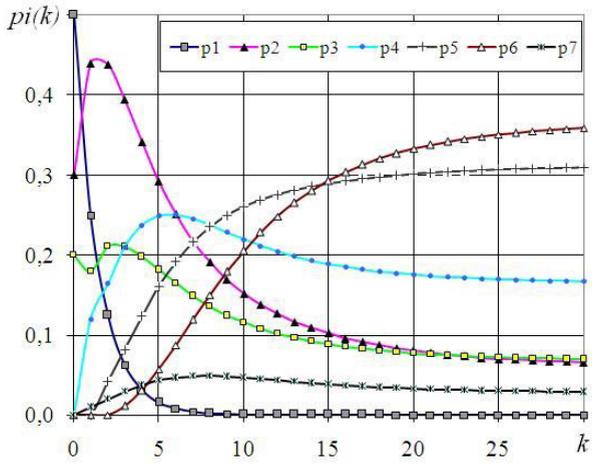


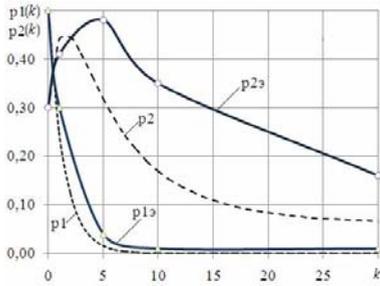
Рис. 3. Изменение вероятности состояний процессов создания имиджа:  
 $S_1$  – неосведомленность;  $S_2$  – положительное отношение;  $S_3$  – доверие;  
 $S_4$  – высокие оценки;  $S_5$  – уверенный выбор;  $S_6$  – безразличие;  
 $S_7$  – неприятие

Результаты моделирования процесса с помощью марковской модели показывают, что при развитии деятельности по формированию имиджа учебного заведения происходит изменение вероятностей различных состояний. Для принятых начальных условий  $p_1(0) = 0,6$ ;  $p_2(0) = 0,3$ ;  $p_3(0) = 0,2$ ;  $p_4(0) = 0$ ;  $p_5(0) = 0$ ;  $p_6(0) = 0$ ;  $p_7(0) = 0$  и указанных выше значений переходных вероятностей получим общую картину развития системы. Для данного уровня компетентности и организованности команды проекта, соответствующих совокупности значений переходных вероятностей, определяемых экспертным методом, можно сделать следующие выводы. При заданных условиях вероятность состояния 6 – «Положительный имидж» – неуклонно возрастает. Одновременно с этим происходит увеличение вероятности состояния 5 – «Уверенный выбор». Результаты показывают, что в системе имеются существенные резервы. Это относится, прежде всего, к усилению работы с контингентом, который имеет отрицательные установки по восприятию имиджа учебного заведения.

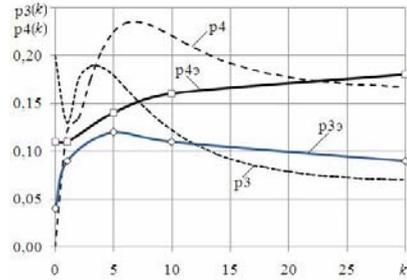
Выполним сопоставление экспериментальных анкетных данных по колледжу Цинь с результатами моделирования с использованием разработанной модели марковской цепи. Переходные вероятности в марковской цепи определялись экспертами с учетом особенностей функционирования технического колледжа г. Ксианианг.

Естественно, ожидалось, что анкетные данные по колледжу Цинь и результаты моделирования для технического колледжа г. Ксианианг могут не совпадать. Эта гипотеза в полной мере нашла свое подтверждение (рис. 4 и рис.5). По некоторым состояниям сохраняется характер изменения вероятностей состояний, например, по состояниям  $p_1$ . Математическая обработка результатов сопоставления не выполнялась, т.к. уже на стадии визуального анализа стало ясно, что результаты моделирования для одного колледжа не пригодны для другого колледжа. Это положение является прямым следствием закона Бушуева С.Д.: «Команда проекта и его турбулентное окружение составляют систему, в которой существующие взаимосвязи определяют результат проекта» [2, 4].

Однако, в целом, следует признать справедливым известное утверждение о том, что экспериментально-аналитические модели, какими, собственно, и являются марковские модели, применимы только в тех условиях и для тех объектов, для которых они получены. Эти выводы уточняют область применения марковских моделей. Для каждого нового объекта необходимо находить только ему присущие значения переходных вероятностей.



*Рис. 4. Сопоставление данных анкет и расчетов цепи Маркова:  $p1э$  и  $p2э$  – экспериментальные данные;  $p1$  и  $p2$  – результаты моделирования цепи Маркова*



*Рис. 5. Сопоставление данных анкет и расчетов цепи Маркова:  $p3э$  и  $p4э$  – экспериментальные данные;  $p3$  и  $p4$  – результаты моделирования цепи Маркова*

Полученные на основе экспериментальных анкетных данных значения переходных вероятностей «настраивают» марковскую модель на описание свойств конкретной уникальной системы. Получены такие значения переходных вероятностей:

$$\|\pi_{ij}\| =$$

0,6	0,3	0				0,1
	0,85	0,15				
	0,15	0,2	0,6			0,05
		0,15	0,42	0,40		0,03
			0,15	0,65	0,20	
		0,10		0,25	0,65	
	0,20					0,80

Выполним оценку результатов построения графиков по переходным вероятностям, полученным на основе данных анкетирования и решения обратной задачи цепи Маркова для колледжа Цинь (рис. 6 и рис. 7).

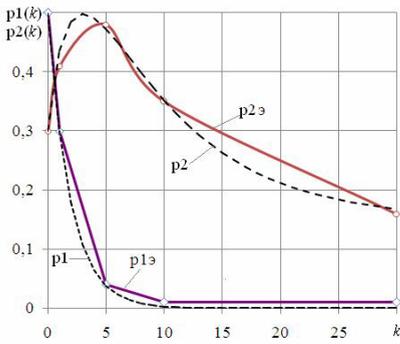


Рис. 6. Сопоставление данных анкет и расчетов цепи Маркова:  $p1э$  и  $p2э$  – экспериментальные данные;  $p1$  и  $p2$  – результаты моделирования цепи Маркова

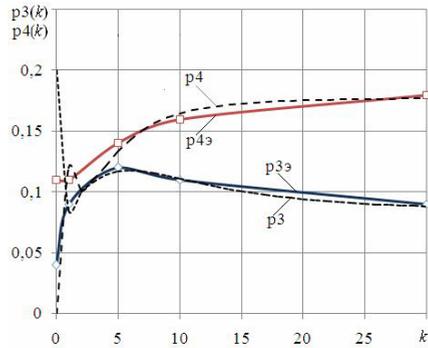


Рис. 7. Сопоставление данных анкет и расчетов цепи Маркова:  $p3э$  и  $p4э$  – экспериментальные данные;  $p3$  и  $p4$  – результаты моделирования цепи Маркова

Статистическая оценка результатов показала, что максимальная допустимая ошибка данных составляет не более  $\max_{\text{ош}} = 3\sigma = 0,1032$ . Это значение больше величины отклонений ( $p1 - p1э$ ) данных, представленных на рис. 6 и рис. 7. Следовательно, данные расчета состояний с применением марковской модели не содержат грубую ошибку. Результаты оценки адекватности марковской модели с переходными вероятностями, которые получены на основе анкетного опроса 385 респондентов, позволяют предположить, что полученная марковская модель удовлетворительно описывает реальные данные.

**Выводы.** Показано, что марковские модели, применимы только в тех условиях и для тех объектов, для которых они получены. Эти выводы уточняют область применения марковских моделей. Для каждого нового объекта необходимо находить только ему присущие значения переходных вероятностей. Это положение является прямым следствием закона Бушуева С.Д.: «Команда проекта и его турбулентное окружение составляют систему, в которой существующие взаимосвязи определяют результат проекта» [2].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ма Фен. Моделирование процесса формирования и управления имиджем учебного заведения с помощью цепей Маркова // Управління проектами: стан та перспективи. IX Міжнар. наук.-практ. конф. – Миколаїв: НУК, 2013.*
2. *Вайсман В.А. Теория проектно-ориентированого управления: обоснование закона Бушуева С.Д. [Текст] / В.А. Вайсман, В.Д. Гогунский, С.В. Руденко // Зб: Наук. записки Міжнар. гуманітарного ун-ту. – Одеса: МГУ, 2009. – С. 9-13.*
3. *Бушуев С.Д. Напрями дисертаційних наукових досліджень зі спеціальності «Управління проектами та програмами» [Текст] / С.Д. Бушуев, В.Д. Гогунський, К.В. Кошкін // Управління розвитком складних систем. – 2012. – № 12. – С. 5-7.*
4. *Гогунский В.Д. Основные законы проектного менеджмента [Текст] / В.Д. Гогунский, С.В. Руденко // IV міжнар. конф.: «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв: НУК, 2008. – С. 37-40.*
5. *Белоцицкий А.А. Управление проблемами в методологии проектно-векторного управления образовательными средами [Текст] / А.А. Белоцицкий // Управління розвитком складних систем. – 2012. – № 9. – С. 104-107.*
6. *Рач В.А. Побудова термінологічної системи організації наукового знання [Текст] / В. Рач, О. Россошанська, О. Медведева // Науковий світ. – 2011. - № 4. – С. 13 – 16.*
7. *Тесленко П.А. Эволюционная парадигма проектного управления / П.А. Тесленко, В.Д. Гогунский // Управління проектами: стан та перспективи: Міжнар. наук.-практ. конф. – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 114-117.*
8. *Колеснікова К.В. Розробка марківської моделі станів проектно керованої організації [Текст] / К.В. Колеснікова, В.О. Вайсман, С.О. Величко // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Вип. 7. – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 217-222.*
9. *Колеснікова К.В. Оптимізація структури управління проектно керованої організації / К.В. Колеснікова, В.О. Вайсман // Вестник СевНТУ. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – Вып. 125: Автоматизация процессов и управление. – С. 218-221.*
10. *Колеснікова К.В. Моделювання стратегічного управління міжнародною діяльністю університету [Текст] / К.В. Колеснікова, С.М. Гловацька, С.В. Руденко // Проблеми техніки. – 2013. – № 1. – С. 95-101.*

11. Розробка марківської моделі зміни станів пацієнтів в проектах надання медичних послуг [Текст] / С.В. Руденко, М.В. Романенко, О.Г. Катуніна, К.В. Колеснікова // Управління роз-витком складних систем. – № 12. – 2012. – С. 86-89.
12. Оборская А.Г. Модель эффектов коммуникаций для управления рекламными проектами [Текст] / А.Г. Оборская, В.Д. Гогунский // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 31-34.
13. Гогунский В.Д. Разработка моделей коммуникаций в рекламных проектах [Текст] / В.Д. Гогунский, А.Г. Оборская // Наук. вісник міжнар. гуманітарного ун-ту. – № 1. – Одеса: МГУ, 2010. – С. 48-53.
14. Яковенко В.Д. Прогнозування стану системи керування якістю навчального закладу [Текст] / В.Д. Яковенко, В.Д. Гогунський // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2009. – № 2. – С. 50-57.
15. Власенко О.В. Модель «ДІАМАНТ» оцінки внутрішніх комунікацій в Європейських проектах [Текст] / О.В. Власенко, Д.В. Лук'янов, В.Д. Гогунський // Вост.-Европ. журнал передових технологій. – 2013. – № 1/10 (61). – С. 86-88

*Стаття надійшла до редакції 19.09.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор кафедри «Судно-ремонт» Одеського національного морського університету **А.В. Шахов**

УДК 656.06

Е.В. Кириллова

**УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ СУДНА И СУДОВОЙ МЕНЕДЖМЕНТ:  
ЭТИМОЛОГИЯ ПОНЯТИЙ, ГЕНЕЗИС РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ**

*В статье рассматривается понятие «управление судном», проводится сравнительный анализ понятий «управление работой судна (флота)» и «судовой менеджмент» в контексте профессиональной сферы морского бизнеса.*

**Ключевые слова:** управление, менеджмент, судно, судоходная компания, владелец судна, судовладелец.

*У статті розглядається поняття «управління судном», проводиться порівняльний аналіз понять «управління роботою судна (флоту)» та «судновий менеджмент» в контексті професійної сфери морського бізнесу.*

**Ключові слова:** управління, менеджмент, судно, судноплавна компанія, власник судна, судновласник.

*The article discusses the concept of "management of the ship", a comparative analysis of the concepts of "management of the ship (fleet)" and "ship management" in the context of the professional sphere of maritime business.*

**Keywords:** administration, management, ship, shipping company, owner of the vessel, the ship owner.

Постановка проблемы в общем виде. Сегодня нередко поднимается вопрос, в чем отличие между управлением проектами и проектным менеджментом, управлением финансами и финансовым менеджментом, управлением инновациями и инновационным менеджментом? Аналогичные вопросы возникают при рассмотрении научно-теоретических и практических аспектов профессиональной сферы морского бизнеса, в частности, относительно таких широко распространенных понятий, как «управление судном», «управление работой судна (флота)» и «судовой менеджмент», между которыми сегодня зачастую ставится знак равенства.

Исследование этих понятий, выявление различий между ними и четкая трактовка их семантического значения является важной научно-теоретической задачей. Ее решение позволит раскрыть содержание этих понятий, прийти к ясной и однозначной коммуникации между субъектами рынка транспортных услуг и избежать возникновения дискуссионных вопросов терминологического характера в кругах научной общественности.

Понятия «управление судном», «управление работой судна (флота)» и «судовой менеджмент» базируются на таких общих категориях как «управление» и «менеджмент». Академические споры относительно

© Кириллова Е.В., 2013

последних двух понятий не утихают до сих пор. Существует огромное количество работ, освещающих вопросы управления [1, 2] и менеджмента [3, 4], а также публикаций [5-7], рассматривающих их сходства и различия.

В нашей стране в период перехода от социалистического строя к рынку многие не видели разницы между понятиями «управление» и «менеджмент». Это приводило к недооценке достижений нашей страны в соответствующих направлениях научной и практической мысли, и попытке монополизации Западом всего комплекса теоретических и методических положений в рамках проектного, инновационного и др. видов менеджментов. Накопленные же знания в области управления проектами, управления инновациями, управления работой флота не были выделены отечественными учеными в самостоятельные сферы знаний. В свою очередь, западные коллеги, коммерчески мыслящие, предпринимательски настроенные и социально адаптированные к условиям рыночной экономики, представляли миру новые направления научной и практической деятельности, называя их «Проектный менеджмент», «Инновационный менеджмент», «Судовой менеджмент» и т. п.

Очевидно, что можно выделить два основных подхода к раскрытию сути понятий «управление» и «менеджмент». Первый предусматривает их синонимичность. Второй – нетождественность.

Что касается первого подхода, то с точки зрения лингвистики, разница между этими понятиями, действительно отсутствует, поскольку в дословном переводе на русский язык «менеджмент» обозначает «управление». Несмотря на существование такого подхода, предусматривающего синонимичность рассматриваемых терминов, в общеизвестных и широко доступных определениях понятий «управление» и «менеджмент» [1-7] ясно прослеживается их нетождественность, что говорит в пользу второго – диаметрально противоположного подхода. Так, исходя из общей теории управления, одноименное понятие применяется к системам различной природы (биологическим, социально-экономическим, техническим), а также различным сферам и уровням хозяйствования (например, управление государством, отраслью, предприятием, наукой внешнеэкономической деятельностью, транспортом и т. п.). В свою очередь, М. Мескон [3] и целый ряд других авторов под менеджментом понимают только управление коммерческими организациями любого типа. При этом, как указывается в [8], менеджмент – это совокупность принципов, методов, средств и форм управления производством с целью повышения эффективности и увеличения прибыли.

Указанное выше делает правомочным тезис о том, что «менеджмент» – значительно более узкое понятие, чем «управление». Об этом говорится и в работе [9], где менеджмент так же рассматривается как разновидность управления, как один из видов человеческой деятельности. При этом, автор данной работы отмечает, что, используя понятия «менедж-

мент» и «управление» как идентичные, отечественная наука следует моде на иностранную терминологию и подменяет один термин другим, что «... неверно ни с теоретической, ни с организационной точек зрения».

Таким образом, менеджмент – это одна из разновидностей управления, которая применяется к хозяйственной деятельности людей в условиях рынка и свободы предпринимательства, а ее результатом является получение прибыли [3, 8]. Однако, как отмечается в [7], получение прибыли не является единственным возможным результатом человеческой деятельности и критерием ее эффективности. Например, критерием достижения успеха может быть победа в войне, освоение новых территорий, разработка современных технологий и т. п.

В связи с этим, такие грандиозные проекты, как Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали, Волго-Донской и Беломор каналы, Волжская и Братская гидроэлектростанции, ядерная и космическая программы, а также такие результаты человеческой мысли, как методы управления проектами и инновациями, транспортными системами и работой флота, разработанные и реализованные в нашей некогда общей стране – являются результатом креативной мысли и эффективной управленческой работы, но не имеют никакого отношения к западному проектному, инновационному или судовому видам менеджмента.

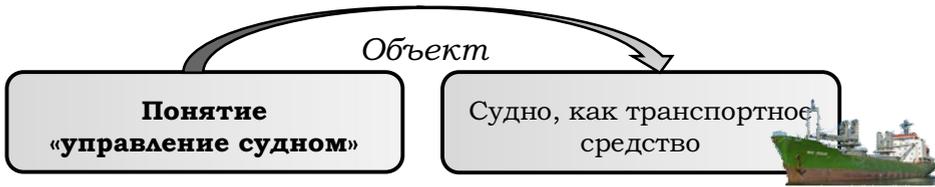
Таким образом, наличие других критериев успешной деятельности человека также свидетельствует в пользу второго подхода к пониманию и толкованию рассматриваемых терминов, который говорит об их нетождественности.

Кроме того, как только дело касается какой-либо специальной области знаний или профессиональной сферы деятельности, то разница между понятиями «управление» и «менеджмент» становится очевидной.

**Формулировка цели статьи.** Целью исследования является совершенствование теории транспортных процессов и систем в части терминологического аппарата профессиональной сферы морского бизнеса путем уточнения и разграничения понятий «управление судном», «управление работой судна (флота)» и «судовой менеджмент» с позиции их этимологии (происхождения), а также генезиса развития теории и практики.

**Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных результатов.** С точки зрения теории систем и системного анализа, любая система состоит из управляемой подсистемы (объекта управления) и управляющей подсистемы (субъекта управления).

Что касается понятия «управление судном», оно связано с управлением данной технической системой, как транспортным средством, которое совершает движение на границе двух сред – воды и воздуха, испытывая при этом гидродинамическое и аэродинамическое воздействия [10]. Для достижения и поддержания необходимых параметров движения судна им необходимо управлять, т. е. обеспечивать его движение заданным курсом, по требуемой траектории, с определенной скоростью. В указанном смысле судно является объектом управления (рис. 1).



*Рис. 1. Объект управления, характеризующий содержание понятия «управление судном»*

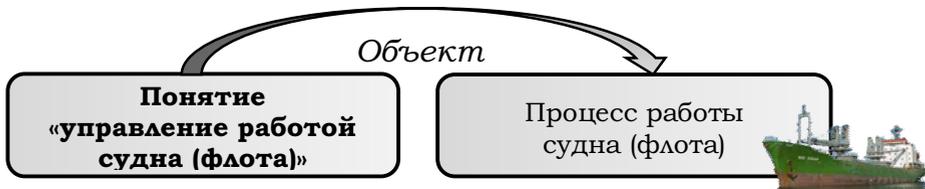
Его управляемость – это способность удерживать заданное направление движения или изменять его под действием управляющих устройств (средств управления), которые, в свою очередь, приводятся в действие автоматически или человеком (субъектом управления). Главными управляющими устройствами судна являются средства управления рулем, средства управления движителем, средства активного управления и т. п. В связи с вышесказанным использование словосочетания «менеджмент судна» в данном контексте не отражает понятийной сущности процесса, обозначаемого понятием «управление судном», как транспортным средством.

Кроме рассмотренного понятия, более детального анализа, уточнения и разграничения в области транспортной терминологии требуют такие понятия как «управление работой судна (флота)» и «судовой менеджмент».

Эксплуатации морского флота посвящено большое количество специальной литературы, как отечественных [11, 12], так и зарубежных авторов [13]. С вопросами организации и управления работой флота связаны, главным образом, отечественные исследования [14-22]. Вопросы же по теме судового менеджмента не достаточно освещены в этих трудах. Исключение составляет учебно-практическое пособие [23]. Наряду с этим данная тематика широко отражена в работах зарубежных авторов [24-26]. Это связано не столько с языковым происхождением этих понятий, сколько с историческими аспектами возникновения и развития соответствующих сфер профессиональной деятельности, которые и начали продуцировать соответствующие научно-теоретические и практические знания.

Так, управлением работой флота в нашей стране занимались на протяжении длительного периода. Известно, что одна из крупнейших в мире компаний «Черноморское морское пароходство» (позже «Бласко») было образовано еще в 1833 г. под названием «Акционерное Черноморское общество пароходов». После революции управление морским транспортом осуществлялось в различных формах прежде, чем он превратился в самостоятельную отрасль народного хозяйства. В послевоенные годы структура управления морским транспортом неоднократно уточнялась и

совершенствовалась: создавались новые пароходства, ликвидировались мелкие предприятия и организации. Все большее число предприятий на бассейнах подчинялось непосредственно пароходствам, которые превратились в комплексные хозяйственные организации, осуществляющие управление флотом, портами, заводами и т. д. Фактическим Владельцем всех судов, при этом, являлось государство [27]. Судовладельцами, в свою очередь, были судоходные предприятия, на баланс которых были переданы эти суда, т. е. государство делегировало часть своих правомочий (право владения и право пользования) пароходствам. Право распоряжения судном государство оставляло за собой, и, следовательно, продать такое транспортное средство можно было только с разрешением его фактического Владельца – государства. При этом все пароходства страны, поддерживаемые государством и отечественной фундаментальной наукой, самостоятельно осуществляли управление работой судов (рис. 2), находящихся на их балансе, не привлекая к этому процессу сторонние организации. В результате многолетнего опыта специалистами – учеными и практиками были разработаны методы и средства эффективной реализации процессов управления работой флота во всем многообразии этой сферы деятельности.



*Рис. 2. Объект управления, характеризующий содержание понятия «управление работой судна (флота)»*

В свою очередь, сфера морского бизнеса, связанная с предоставлением профессиональных услуг по судовому менеджменту, получила широкое распространение в практике мирового судоходства только в конце XX в. Предпосылки к зарождению судового менеджмента на западе появились в 70-х гг. XX в. Обусловлено это было следующей рыночной ситуацией. До 1973 г. фрахтовый рынок характеризовался благоприятной для Судовладельцев конъюнктурой. Банки без особых проблем выдавали кредиты Судовладельцам на приобретение судов. После 1973 г. конъюнктура рынка изменилась, и банки перестали получать выплаты процентов по этим кредитам. Заёмщики – Судовладельцы в течение длительного периода не могли отдавать долги в соответствии с графиками, установленными кредиторами. Несколько лет получаемая их судами прибыль едва позволяла покрывать текущие издержки (зарплату экипажа, бункер, запасные части, сборы, ремонт и т. д.). Средств для выплаты долга практически не оставалось. Когда заемщик – Судовладелец становился неплате-

жеспособным, перед банками возникали две альтернативы:

- первая – заключалась в оказании ему поддержки, включая дополнительную финансовую помощь;
- вторая – предполагала переход права собственности на судно к банку в соответствии с условиями кредитного договора и на основе закладной.

Во втором случае большая часть судов продавалась на аукционах, с тем, чтобы удовлетворить претензии других кредиторов. Иногда Владельцами судов становились сами банки-кредиторы.

К 80-м гг. XX ст. на рынке сконцентрировалось большое количество судов, принадлежащих крупным финансовым учреждениям. Данные организации не имели соответствующей квалификации и надлежащего опыта, чтобы эффективно эксплуатировать эти транспортные средства. В результате финансовые учреждения рассматривали следующие основные варианты решений относительно своих правомочий и возможностей их передачи другим компаниям, которые на определенных условиях были способны обеспечить банкам некоторую прибыль при неблагоприятной конъюнктуре фрахтового рынка:

- отфрахтовать судно по бербоут-чартеру компании, которая взамен получает кредит от данного банка;
- передать судно на условиях бербоут-чартера компании, которая взамен получает возможность приобрести данное судно в будущем (лизинг);
- остаться не только Владельцем судна, но и Судовладельцем при существенном делегировании важных функций другим, более компетентным в этих вопросах, компаниям [27].

Таким образом, тезис о том, что «спрос рождает предложение» вновь подтверждает свою аксиоматичность. Создавшаяся рыночная ситуация стимулировала появление и развитие специализированных компаний, т.е. обусловила появление нового вида морского бизнеса – судового менеджмента. Банки заключали с соответствующими компаниями соглашения о менеджменте, оставляя за собой некоторые функции, главным образом, финансовые. При этом стандартная проформа соглашения о судовом менеджменте отсутствовала вплоть до конца 80-х гг. XX в. Менеджерские компании использовали собственные проформы соглашений. Их условия адаптировались и детализировались применительно к конкретной сделке и тем требованиям, которые выдвигали Собственники судов (или Судовладельцы) в ходе переговоров. Стандартная проформа соглашения о судовом менеджменте под кодовым названием «Шипмен» («Shipman») была разработана Балтийской и международной морской конференцией (БИМКО) только в 1988 г. Указанный документ состоит из двух частей и ряда приложений. В части I этого документа содержится информация о конкретной сделке, а во второй части – определения и пояснения к части I. Данная проформа Соглашения может быть использована для одного или нескольких судов путем выбора приложения «А» или «Б». Кроме то-

го, в части I данной проформы содержится перечень услуг, которые могут быть, по желанию Судовладельца, включены в соглашение о менеджменте путем положительного ответа на вопросы соответствующих пп. 5-13; п. 5. Укомплектование экипажа (Crew Management); п. 6. Технический менеджмент (Technical Management); п. 7. Коммерческий менеджмент (Commercial Management); п. 8. Страхование (Insurance Arrangements); п. 9. Отчетность (Accounting Services); п. 10. Продажа и приобретение судна (Sale or purchase of the Vessel); п. 11. Снабжение провизией (Provisions); п. 12. Снабжение топливом (Bunkering); п. 13. Период услуг фрахтования (Chartering Services Period) (рис. 3). Заполняется п. 13 только, если в боксе 7 «Коммерческий менеджмент» указано «Да». В этом случае менеджерская компания обеспечивает коммерческую эксплуатацию судна в соответствии с требованиями Судовладельца, включая исполнение следующих функций:



*Рис. 3. Объект управления, характеризующий содержание понятия «судовой менеджмент»*

- предоставление услуг фрахтования в соответствии с указаниями Судовладельцев, что включает без ограничения поиск и проведение переговоров о фрахтовании судов и заключение чартеров (включая их исполнение) или иных договоров, относящихся к эксплуатации судна;
- организацию соответствующих платежей Судовладельцам по всем доходам от аренды или фрахта, либо иных средств любого рода, которые причитаются Судовладельцам, исходя из тех или иных форм эксплуатации судна;
- составление рейсовых смет и отчетов, расчет аренды и фрахта, демереджа и диспача, причитающихся от фрахтователей или фрахтовате-

лям судна;

- составление рейсовых инструкций (заданий);
- назначение агентов;
- наем стивидоров;
- организация сюрвея (освидетельствования), связанного с коммерческой эксплуатацией судна.

В настоящее время в терминологии, применяемой в сфере морского бизнеса, кроме рассмотренных выше, также широко используются понятия «оператор» и «оперирование судном (флотом)». Эти понятия тесно связаны с предоставлением менеджерской компанией услуг по эксплуатации судна (флота) на основе соглашения о судовом менеджменте [27].

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Понятие «управление судном» связано с управлением данной технической системой, как транспортным средством, которое совершает движение на границе двух сред – воды и воздуха, испытывая при этом гидродинамическое и аэродинамическое воздействия. При этом объектом управления является судно (рис. 1).

2. Понятия «управление работой судна (флота)» и «судовой менеджмент» связаны с вопросами владения судном, судовладения и возможностью передачи части функций по управлению работой флота другим (менеджерским) компаниям.

3. Понятие «управление работой судна (флота)» шире, чем понятие «судовой менеджмент».

4. Если Владелец судна или Судовладелец самостоятельно решает все вопросы, связанные с эксплуатацией своих судов или судов, используемых им на законных основаниях, то в этом случае, подчеркивая масштабность и многовекторность всего комплекса решаемых задач, целесообразно применять термин «управление работой судна (флота)». Объектом управления при этом является сам процесс работы судна (флота) (рис. 2).

5. В случае, когда Владелец судна или Судовладелец прибегает к услугам специализированных менеджерских компаний, которые на основании договора и за соответствующую плату, предоставляют одну или несколько услуг, связанных с эксплуатационной деятельностью флота, то применим термин «судовой менеджмент». Объектом управления, при этом, является процесс предоставления конкретной услуги, которая отражается в соответствующем соглашении о судовом менеджменте, и предоставляется менеджерской компанией (рис. 3).

Проведенное исследование не исчерпывает всей глубины рассмотренной тематики. Следовательно, перспективы дальнейшего исследования в заданном направлении заключаются в разработке научно-теоретических положений и методических рекомендаций, связанных с вопросами управления работой флота и судового менеджмента с целью развития и совершенствования данных сфер деятельности, а также их адаптации к современным условиям хозяйствования.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гвишиани Д.М. Организация и управление: Монография / Д.М. Гвишиани. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1972. – 536 с.
2. Кнорринг В.И. Теория, практика и искусство управления / В.И. Кнорринг. – М.: Издательская группа Норма-Инфа М, 1999. – 528 с.
3. Мескон М. Основы менеджмента / М. Мескон, М. Альберт, Ф. Хедоури. – М.: Дело, 1997. – 704 с.
4. Герчикова Н.Н. Менеджмент / Н.Н. Герчикова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. – 501 с.
5. Калинина О.В. Сравнительный анализ понятий «управление» и «менеджмент» в социально-экономических системах / О.В. Калинина // Вестник Самарского государственного экономического университета: Сб. научн. тр. – Самара: СГЭУ, 2009. – Вып. 10(60). – С. 37-40.
6. Семёнова И.В. Анализ этимологии терминов «менеджмент» и «управление» / И.В. Семёнова // Фундаментальные исследования: Научный журнал. – М.: Российская академия естествознания, 2012. – № 11 ( 4). – С. 1015-1018.
7. Карлинская Е.В. Управление и менеджмент – в чем разница? [Электронный ресурс] / Е.В. Карлинская. – Режим доступа: [http://karlinskaya.blogspot.com/2010/07/blog-post\\_29.htm](http://karlinskaya.blogspot.com/2010/07/blog-post_29.htm).
8. Толковый словарь рыночной экономики / Под общ. ред. Ф.А. Крутикова. – 2-е изд., доп. – М.: Глория, 1993. – 301 с.
9. Лапин В.Н. Малый бизнес в Российской Федерации: Монография / В.Н. Лапин. – Саратов: Научная книга, 2009. – 250 с.
10. Управление судном / С.И. Демин, Е.И. Жуков, Н.А. Кубачев и др. / Под ред. В.И. Снопкова. – М.: Транспорт, 1991. – 359 с.
11. Бакаев В.Г. Эксплуатация морского флота / В.Г. Бакаев. – М.: Транспорт, 1965. – 560 с.
12. Снопков В.И. Эксплуатация специализированных судов / В.И. Снопков. – М.: Транспорт, 1987. – 287 с.
13. Alderton P.M. Sea Transport: operation and economics / P.M. Alderton. – London: Thomas reed, 1986. – 226 p.
14. Громовой Э.П. Математические методы и модели в планировании и управлении на морском транспорте / Э.П. Громовой. – М.: Транспорт, 1979. – 360 с.
15. Немчиков В.И. Организация работы и управление морским транспортом / В.И. Немчиков. – М.: Транспорт, 1982. – 343 с.
16. Экономико-математические методы и модели в управлении морским транспортом / Е.Н. Воевудский, Н.А. Коневцева, Г.С. Махуренко, И.П. Тарасова / Под ред. Е.Н. Воевудского. – М.: Транспорт, 1988. – 384 с.

17. Шибяев А.Г. Подготовка и обоснование решений по управлению перевозками и работой флота морской судоходной компании: Монография / А.Г. Шибяев. – Одесса: ХОРС, 1998. – 208 с.
18. Лапкин А.И. Организация и управление работой флота последовательными рейсами: Монография / А.И. Лапкин. – Одесса: ОГМУ, 2000. – 199 с.
19. Панарин П.Я. Управление работой морского флота / П.Я. Панарин. – Одесса: ОГМУ, 2001. – 213 с.
20. Кириллова Е.В. Организация и управление работой судов в ролкерной транспортно-технологической системе: Дис. канд. техн. наук: 05.22.01 / Е.В. Кириллова. – Одесса, 2005. – 229 с.
21. Шибяев А.Г. Управление работой флота / А.Г. Шибяев, Е.В. Кириллова, Ю.И. Кириллов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Изд-во ОНМУ, 2011. – 120 с.
22. Шибяев А.Г. Управление работой флота. Основы теории и практики / А.Г. Шибяев, Е.В. Кириллова, Ю.И. Кириллов. – Одесса: Фенікс, 2012. – 187 с.
23. Марков В.В. Судовой менеджмент: Учебно-методическое пособие / В.В. Марков. – Одесса: КП ОМД, 2012. – 318 с.
24. Hobart Stephen Perry Ship Management and Operation / Hobart Stephen Perry. – Simmons-Boardman publishing Company, 1931. – 310 p.
25. Spruyt J. Ship Management / John Spruyt. – London: Lloyd's of London Press, 1990. – 222 p.
26. Spruyt J. Ship management / John Spruyt. – 2-nd ed. – London: Lloyd's of London Press Ltd., 1994. – 259 p.
27. Кириллова Е.В. Формы судовладения в системе морских правоотношений / Е.В. Кириллова // Современные направления теоретических и прикладных исследований `2012: Сб. научн. тр. SWorld по материалам междунаучно-практ. конф., 20-31 марта 2012 г. Одесса. Т. 1 Транспорт. – Одесса: Куприенко С.В., 2012. ЦИТ: 112-210. – С. 39-44.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2013

**Рецензент** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Менеджмент і маркетинг на морському транспорті» Одеського національного морського університету **М.Я. Постан**

УДК 008.5

Е.В. Колесникова

**ТЕОРИЯ ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ:  
ЗАКОН КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РИСКА**

*Разработана модель отображения риска в проектах на основе представления оценки в виде однородной марковской цепи с дискретными состояниями и временем. Применение предложенной модели позволяет перейти от одномерных к многомерным оценкам при контроле уровня риска в проектах.*

**Ключевые слова:** проекты, состояния, риск, оценка, система, марковская цепь, управление.

*Розроблена модель відображення ризику в проектах на основі представлення оцінки у вигляді однорідного марківського ланцюга з дискретними станами і часом. Застосування запропонованої моделі дозволяє перейти від одновимірних до багатовимірних оцінок при контролі рівня ризику в проектах.*

**Ключові слова:** проекти, стани, ризик, оцінка, система, марківський ланцюг, управління.

*A model for mapping risk in projects through the provision of assessment in the form of a homogeneous Markov chain with discrete states and time. The application of this model allows us to go from one-dimensional to multidimensional estimates in controlling the level of risk in projects.*

**Keywords:** project, state, risk, assessment, system, the Markov chain, management.

**Постановка проблемы в общем виде.** Проектом в общем случае называется “ограниченное во времени целенаправленное изменение отдельной системы с установленными требованиями к качеству результатов, возможными рамками расхода средств и ресурсов и специфической организацией”[1]. Развитие научного направления управления проектами ориентировано на исследование явлений и сущности, связей и закономерностей в процессах управления проектами / программами / портфелями на протяжении жизненных циклов, как управляемых социальных или организационно-технических систем с признаками уникальности [2]. Получение полезных результатов и их ценности осуществляется благодаря созданию продуктов, которые создаются при реализации проектов, в результате которой формируются модели, методы, способы и механизмы проектного управления [2, 3].

Ориентация на разрешение проблем управления проектами благодаря примерам наилучшей практики не всегда оказывается плодотворной. Поэтому для совершенствования проектного управления организациями и предприятиями необходимо осуществлять обобщение накопленных примеров наилучшей практики и разрабатывать на их основе аксиомы, правила и законы [4-8]. Особое внимание должно уделяться оценке уровня риска проектов, который зависит от множества случайных факторов. В подобной слабо структурированной системе оценка уровня риска чаще всего выполняется на качественном уровне с применением SWOT-анализа, который позволяет оценить сильные и слабые аспекты взаимодействия команды проекта с внешней и внутренней средой [1]. Для формирования количественных оценок уровня риска предлагается феноменологический подход, когда модель отображения свойств системы строится как зависимость параметров состояний системы от некоторых входных управляющих воздействий. При этом не детализуется внутренняя сущность процессов в системе, а рассматриваются связи «вход-выход» системы.

**Цель статьи.** Разработка модели отображения риска в проектах с применением однородной марковской цепи с дискретными состояниями и временем, что позволит перейти к многомерным оценкам при контроле уровня риска в проектах. Задача настоящего исследования состоит в научно обоснованном толковании закона контроля параметров процессов проекта, сформулированного проф. Ю.Л. Воробьевым [4].

**Анализ публикаций по оценке состояний проектов.** Управление проектами (программами) портфелями проектов сложный вид деятельности в слабо структурированных сложных системах, включающих в себя проект, планируемые процессы, множество участников, а также центры поддержки и торможения проекта [2]. Применяются два вида управления проектами – реактивное и проактивное [3]. Первый вид управления состоит в реакции на некоторые события, которые уже произошли в результате случайных причин. В современной практике преобладает этот подход к управлению. Проактивное (упреждающее) управление осуществляется на основе некоторых ожиданий результатов и состояния окружения проекта. Внедрение проактивного управления базируется на применении моделей, которые позволяют заблаговременно оценить эффективность, как отдельных фаз и процессов, так и проекта в целом [6]. При этом универсальным показателем успешности, например, проектов экологической направленности может служить уровень риска [1, 9, 10].

Существуют две давно сложившиеся точки зрения на риск. Первая основана на научных и технических оценках и характеризует так называемый теоретический риск. Вторая – основана на человеческом восприятии риска и называется эффективным риском [10].

*Теоретический риск* выражается в форме статистического показателя, который часто сводится к вероятности некоторого нежелательного события. Обычно вероятность такого события и оценка его ожидаемого

вред объединяются в один показатель, который сочетает в себе вероятность риска и уровень ущерба.

Таким образом, в статистической теории принятия решений функция риска оценки  $\delta(x)$  для параметра  $\theta$ , вычисленная при параметрах  $x$ , определяется как математическое ожидание от функции потерь  $L$

$$R(\theta) = \int L(\theta, \delta(x)) \cdot f(x | \theta) dx, \quad (1)$$

где  $L(\theta, \delta(x))$  – функция ущерба от параметра  $\theta$  и значения оценки  $\delta(x)$ ;  
 $f(x | \theta)$  – вероятность нежелательного события.

На практике, как правило, используют частные формы (1), состоящие в том, что зависимость существенно упрощается, если учесть конкретные условия выполнения оценки риска. Вероятность события, определяется частотой реализации состояний

$$P = f(x | \theta) = \frac{N(t)}{Q(x)}, \quad (2)$$

где  $N(t)$  – число нежелательных событий за период  $t$ ;  
 $Q(x)$  – общее число событий в системе.

В настоящем исследовании предлагается рассматривать не только нежелательные события, а распределение всех событий в системе по  $s$ -уровням успешности

$$p_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^m n_j}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^s p_i = 1 \quad (4)$$

где  $i$  – индекс состояния успешности проекта,  $i = 1 \dots s$ ;  
 $p_i$  – вероятность (частота) состояний успешности проекта,  $0 < p_i < 1$ ;  
 $n_i$  – число событий для соответствующих состояний,  $i = 1 \dots s$ ;  
 $m$  – общее число событий.

Для функции потерь  $L(\theta, \delta(x))$  обычно принимают некоторую стоимостную меру единицы риска, которая характеризует последствия события. Например, стоимостная мера наибольшего риска проекта может быть принята равной размеру ущерба из-за провала проекта. Подобную стоимостную оценку можно установить и для других уровней успешности проекта. Стоимостная мера риска является выражением уровня развития общественных отношений, а не характеристикой качества организационно-технической системы.

При сформулированных положениях риск в зависимости от уровня успешности представляет собой произведение двух величин: ущерба (или прибыли) и вероятности состояния.

**Обоснование закона Ю.Л. Воробьева.** Как известно, управление некоторой деятельностью направлено на изменение структуры либо параметров состояния преобразуемой системы. Объектами управления

могут быть технические системы (машины, станки, устройства), а также социальные или организационно-технические системы с признаками уникальности. Утверждение проф. Ю.Л. Воробьева относится как к отдельным фазам и работам, так и к общей оценке успешности проекта: “Ожидаемые выгоды и реальные потери в проектах пропорциональны уровню риска (авантюризма)” [4].

Оно устанавливает, что существует некоторая обобщенная характеристика успешности проекта, от которой зависит результат проекта. Следовательно, все взаимосвязи, составляющие основу различных структур организационно-технического управления, наряду с характеристиками эффективности отдельных процессов проектов являются определяющими свойствами систем проектно ориентированного управления.

При этом в одну систему объединяются три укрупненных сущности проекта: ожидаемые выгоды, реальный ущерб и уровень риска. Риск может быть проявлением множества случайных факторов турбулентного окружения, компетенций команды, коммуникаций проекта и др.

Представим результат некоторого  $j$ -го проекта выражением [5]

$$Y_j = f(I, P, D, C, A, E)_j,$$

где  $I = i(k, TO) \pm \Delta_I$  – результат инициации проекта;

$P = p(k, TO, I) \pm \Delta_P$  – результат проектной фазы проекта;

$D = d(k, TO, I, P) \pm \Delta_D$  – результат фазы исполнения проекта;

$C = c(k, TO, I, P, D) \pm \Delta_C$  – результат контроля проекта;

$A = a(k, TO, I, P, D, C) \pm \Delta_A$  – результат процесса улучшения проекта;

$E = e(k, TO, I, P, D, C, A) \pm \Delta_E$  – результат фазы завершения проекта;

$k$  – команда проекта;

$TO$  – турбулентное окружение проекта.

Функционал  $f(I, P, D, C, A, E)_j$ , как результат проекта зависит от управления во всех фазах проекта. Существующие отклонения в промежуточных состояниях проекта могут накапливаться, что является причиной проявления риска. При этом подразумевается, что риск в первом приближении определяется как произведение вероятности наступления негативных событий на величину ущерба из-за этих событий. Следовательно, ожидаемые выгоды и реальные потери в проектах пропорциональны уровню риска проекта, так как ущерб является заданной величиной, а вероятность наступления событий, которые ведут к уменьшению эффективности проекта, может принимать значения в интервале  $[0 \leq p_i \leq 1]$ .

Выполним классификацию данного утверждения по признакам: объект, метод, результат, следствие, правило.

Утверждение	Ожидаемые выгоды и реальные потери в проектах пропорциональны уровню риска (авантюризма).
Объект	Область знаний управления проектами: как влияет уровень риска на результаты проекта.
Метод	Эмпирическая закономерность на основе практики управления проектами
Результат	Характеристика качества выполнения проекта.
Следствие	Риск является объективной интегральной характеристикой уровня успешности проекта.
Правило	Задача команды при управлении проектом состоит в уменьшении уровня риска, хотя в силу свойств риска он никогда не может быть исключен.

Следовательно, утверждение проф. Ю.Л. Воробьева можно отнести к категории закона.

*Следствие закона Ю.Л. Воробьева.* При выполнении проекта от фазы инициации до завершения проекта решается основная задача достижения результата проекта с учетом установленных ограничений по срокам, ресурсам, качеству и риску. Все эти факторы генерируют ситуации принятия решений, которые реализуются с определенным уровнем риска. Поэтому стремление к наивысшему качеству проекта должно быть определяющим, а цели проекта должны быть конкретными, измеримыми, достижимыми, ориентированными на результат и привязанными ко времени (система целей SMART – Specific, Measurable, Achievable, Result – oriented, Time – specific).

Применение марковских цепей для моделирования изменений вероятностей состояний технических или социальных систем основывается на структурном и параметрическом подобии этих систем их отображениям с помощью марковских моделей [12]. Марковской моделью представлена организационно-техническая система изменения состояний пациентов в проектах предоставления медицинских услуг [12]. Разработка марковской модели изменения состояний для проектно-ориентированного управления станкостроительным предприятием выполнена в [13]. Управление рекламными проектами с использованием марковской модели предложено в работах [14, 15]. Показана эффективность использованных марковских моделей для оценки качества работы учебных заведений [16]. Указанные примеры объединяет наличие декомпозиции исследуемых систем на определенные дискретные состояния с построением графа переходов между этими состояниями. Различия указанных моделей состоят в разных способах определения условных вероятностей переходов между дискретными состояниями.

**Разработка модели отображения риска в проектах.** Проявления различных событий в проекте отображается с помощью индикаторов возможного их проявления, что способствует реализации потенциального риска в будущем. Состояния оценки проекта развиваются как случайный

процесс, ход и результат, которого зависят от случайных факторов, влияющих на его показатели и общие результаты. По аналогии с рекомендациями [10] предлагается при экспертном оценивании рисков успешности проектов использовать степень совершенства проекта с переводом нечетких высказываний экспертов в балльные оценки (таблица).

*Таблица*

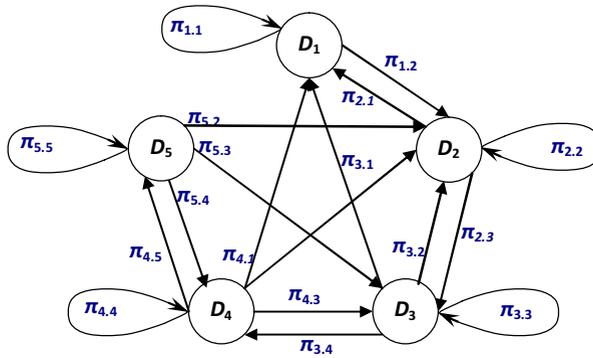
*Состояния успешности как степень совершенства проектов*

Степень совершенства	Характеристика состояния в модели 5П	Балл	Состояние
Нет формального подхода (Провальный проект)	Нет системного подхода, низкие либо не прогнозируемые	1	D <sub>1</sub>
Реагирование на события (Предельный риск)	Реактивное управление для устранения проблем или коррекции коммуникаций	2	D <sub>2</sub>
Стабильный формальный системный (Пограничный риск)	Внедрен системный контроль, имеются данные о соответствии целям и есть тенденции к улучшению	3	D <sub>3</sub>
Сосредоточенность на постоянном улучшении (Приемлемый риск)	Применяется процесс улучшения, хорошие результаты и устойчивые тенденции к улучшению	4	D <sub>4</sub>
Наилучшие показатели (Пренебрежимый риск)	Лучшие результаты по сопоставимой оценке с известными эталонами	5	D <sub>5</sub>

В соответствии с градацией состояний успешности как степени совершенства проектов (табл.) предлагается «модель 5П» - пяти уровней совершенства: **Провальный проект**, **Предельный риск**, **Пограничный риск**, **Приемлемый риск**, **Пренебрежимый риск**. Эта модель является универсальной и может быть применена для любых проектов и их составляющих, характеризующих основные аспекты проектов с позиций менеджмента качества.

Представим в виде графа переходы из одного состояния  $D_i$  в другие  $D_j$ , где обозначим вероятности  $\pi_{ij} \{i = \overline{1,5}; j = \overline{1,5}; i \neq j\}$  переходов в другие состояния, а также вероятности  $\pi_{ij} \{i = \overline{1,5}; j = \overline{1,5}; i = j\}$  сохранения текущих состояний (рис. 1). Указанные переходные вероятности можно

определить экспертными методами. Полученная однородная марковская цепь с дискретными состояниями и временем разрешается известными методами [12 – 15].



*Рис. 1. Розмечений граф изменения состояний  
степени совершенства проекта:  
D<sub>i</sub> – дискретные состояния;  
π<sub>ij</sub> – переходные вероятности*

Дополнительно, по сравнению с рекомендациями ISO [10], на графе обозначены переходы на другие уровни совершенства проектов через один, два и даже три уровня (табл. 1). Эти переходы могут иметь место в случае проведения организационных, коммуникационных, профилактических или управленческих действий команды проекта.

Опишем однородную марковскую цепь с дискретными состояниями и дискретным временем, которое изменяется дискретно по шагам [15]. Под шагами понимается некоторый комплекс реализованных в проекте мер-воздействий, которые изменяет показатели  $D_i$ . Пусть в любой момент времени  $t$  (после любого  $k$ -го шага) показатель  $D$  может быть в одном из состояний:  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_5\}$ , то есть реализуется одно из полной группы несовместных событий:  $D_1^{(k)}, D_2^{(k)}, \dots, D_5^{(k)}$ . При этом показатель  $D$  может изменяться на каждом шаге  $k$

$$D = \{p_1(k), p_2(k), \dots, p_5(k)\}.$$

Обозначим вероятность нахождения объекта в состояниях  $j$ :

$j = \overline{1, n}$  на шаге  $k$ :

$k = 1; p_1(1) = P(D_1^{(1)}); p_2(1) = P(D_2^{(1)}); \dots p_5(1) = P(D_5^{(1)})$ .

$k = 2; p_1(2) = P(D_1^{(2)}); p_2(2) = P(D_2^{(2)}); \dots p_5(2) = P(D_5^{(2)})$ ;

.....  
 $k = l; p_1(l) = P(D_1^{(l)}); p_2(l) = P(D_2^{(l)}); \dots p_5(l) = P(D_5^{(l)})$ .

Вероятности  $p_1(k), p_2(k), \dots, p_5(k)$  являются вероятностью состояния однородной цепи Маркова, в которой переходные вероятности не зависят от номера шага. Учитывая свойство вероятности несовместимых действий, образующих полную группу, для каждого шага  $k$

$$p_1(k) + p_2(k) + \dots + p_5(k) = 1.$$

Переходные вероятности  $\pi_{ik} \{i=1\dots n; k=1\dots n; n=5\}$  могут быть получены экспертным методами. Вероятности «задержки»  $\pi_{ii}$ , дополняют до единицы сумму переходных вероятностей из  $i$ -го состояния к другим состояниям за один шаг.

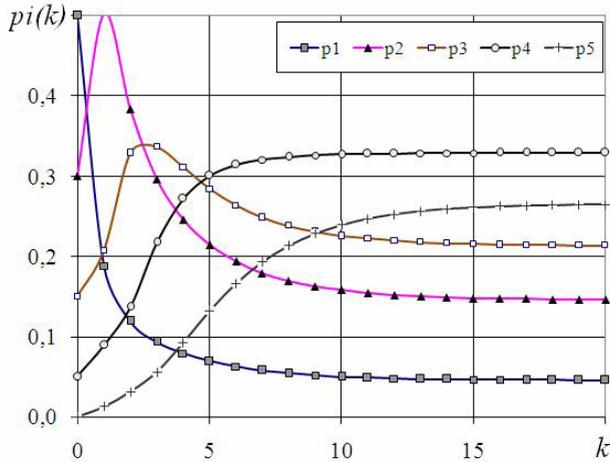
Система уравнений цепи Маркова для расчета вероятностей имеет вид:

$$\begin{aligned} p_1(k+1) &= p_1(k) \cdot \pi_{1,1} + p_2(k) \cdot \pi_{2,1} + p_3(k) \cdot \pi_{3,1} + p_4(k) \cdot \pi_{4,1} + p_5(k) \cdot \pi_{5,1} \\ p_2(k+1) &= p_1(k) \cdot \pi_{1,2} + p_2(k) \cdot \pi_{2,2} + p_3(k) \cdot \pi_{3,2} + p_4(k) \cdot \pi_{4,2} + p_5(k) \cdot \pi_{5,2} \\ p_3(k+1) &= p_1(k) \cdot \pi_{1,3} + p_2(k) \cdot \pi_{2,3} + p_3(k) \cdot \pi_{3,3} + p_4(k) \cdot \pi_{4,3} + p_5(k) \cdot \pi_{5,3} \\ p_4(k+1) &= p_1(k) \cdot \pi_{1,4} + p_2(k) \cdot \pi_{2,4} + p_3(k) \cdot \pi_{3,4} + p_4(k) \cdot \pi_{4,4} + p_5(k) \cdot \pi_{5,4} \\ p_5(k+1) &= p_1(k) \cdot \pi_{1,5} + p_2(k) \cdot \pi_{2,5} + p_3(k) \cdot \pi_{3,5} + p_4(k) \cdot \pi_{4,5} + p_5(k) \cdot \pi_{5,5} \end{aligned} \quad (5)$$

В этой системе 10 переменных, так как переходные вероятности  $\pi_{ij}$  заданы. В пяти уравнениях 10 неизвестных. Для решения этой системы необходимо, чтобы число уравнений было равно числу неизвестных - необходимо добавить, исходя из начальных условий, еще пять связей. Обычно в качестве известных переменных задают вероятности исходного состояния системы  $p_i(k)$ ,  $i = 1 \dots 5$ . Общее решение цепи Маркова, представленной ориентированным размеченным графом на рис. 1

$$\begin{pmatrix} p_1(k+1) \\ p_2(k+1) \\ p_3(k+1) \\ p_4(k+1) \\ p_5(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_{1,1} & \pi_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{2,1} & \pi_{2,2} & \pi_{2,3} & 0 & 0 \\ \pi_{3,1} & \pi_{3,2} & \pi_{3,3} & \pi_{3,4} & 0 \\ \pi_{4,1} & \pi_{4,2} & \pi_{4,3} & \pi_{4,4} & \pi_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{5,4} & \pi_{5,5} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} p_1(k) \\ p_2(k) \\ p_3(k) \\ p_4(k) \\ p_5(k) \end{pmatrix} \quad (6)$$

На основе матрицы переходных вероятностей, при условии, что исходное состояние системы известно, можно найти вероятности состояний  $p_1(k), p_2(k), \dots, p_5(k)$  после каждого  $k$ -го шага управленческих действий на систему. Поведение системы определяется матрицей переходных вероятностей, которая для каждого нового проекта имеет разные значения элементов. Пример результатов моделирования с применением марковской цепи показывает возможность осуществления многомерной оценки вероятности наступления определенных событий (рис. 2).



*Рис. 2. Изменение состояний успешности как степени совершенства проектов:  $p_i(k)$  – вероятности состояний,  $i = 1 \dots 5$ ;  $k$  – номер шага*

Матрица переходных вероятностей для базового варианта проекта (рис. 2)

$$\|\pi_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0,30 & 0,70 & 0 & 0 & 0 \\ 0,10 & 0,45 & 0,45 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,10 & 0,45 & 0,04 & 0 \\ 0,02 & 0,05 & 0,10 & 0,58 & 0,25 \\ 0 & 0,04 & 0,07 & 0,20 & 0,69 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

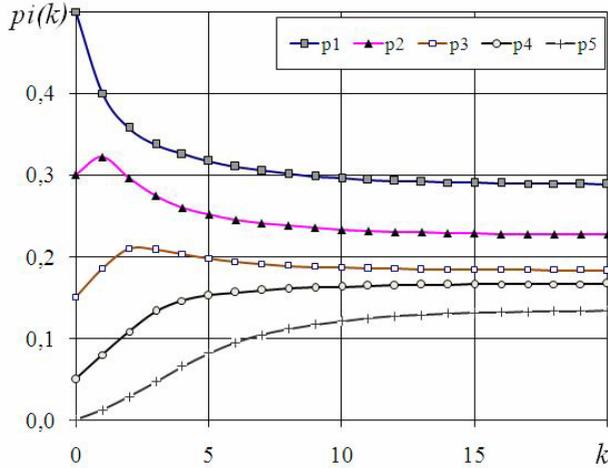
Матрица  $\|\pi_{ij}\|$  отражают некоторое состояние системы, в которой сформированы предпосылки изменения состояний успешности как степени совершенства проектов в ходе их выполнения. Для других проектов будут существовать иные значения элементов матрицы  $\|\pi_{ij}\|$ .

Полученные результаты показывают, что уже на 5-ом шаге проекта максимальной становится вероятность  $p_4(k = 5)$  соответствующая уровню успешности проекта с приемлемым риском. На 15-ом шаге проект выходит в квазистационарное состояние со следующими вероятностями состояний успешности:  $p_1(k = 15) = 0,05$ ;  $p_2(k = 15) = 0,15$ ;  $p_3(k = 15) = 0,22$ ;  $p_4(k = 15) = 0,33$ ;  $p_5(k = 15) = 0,25$ . При таком распределении вероятностей состояний успешности проекта можно ожидать, что завершение проекта будет успешным.

Уровни степени совершенства, например, в экологических проектах можно изменять за счет управляющих воздействий путем правовых, социально-экономических, организационно-технических, санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения [1]. Ведь при допущении ошибок, а так-

же неправильных действий со стороны членов команды проект может перейти в разряд «безнадежных» и не завершиться вообще, или причинить ущерб работающим и окружающей среде [6].

Рассмотрим иной, менее благоприятный, второй вариант исходных данных для моделирования марковской цепи, отображающей степени совершенства проектов (рис. 3).



*Рис. 3. Изменение состояний успешности как степени совершенства проектов:  $p_i(k)$  – вероятности состояний,  $i = 1 \dots 5$ ;  $k$  – номер шага*

Матрица переходных вероятностей для 2-го варианта проекта (рис. 3)

$$\|\pi_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0,60 & \mathbf{0,40} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0,20} & 0,35 & 0,45 & 0 & 0 \\ \mathbf{0,20} & 0,10 & 0,30 & 0,40 & 0 \\ \mathbf{0,20} & 0,05 & 0,10 & 0,40 & 0,25 \\ 0 & 0,04 & 0,07 & 0,20 & 0,69 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Изменения в матрице  $\|\pi_{ij}\|$  отмечены жирным шрифтом. На 15-ом шаге проект выходит со следующими вероятностями состояний:  $p_1(15) = 0,29$ ;  $p_2(15) = 0,23$ ;  $p_3(15) = 0,18$ ;  $p_4(15) = 0,17$ ;  $p_5(15) = 0,13$ . При таком распределении вероятностей можно ожидать, что завершение проекта не будет успешным.

Основной причиной провала проекта, характеристики которого отвечают матрице  $\|\pi_{ij}\|$  для 2-го варианта проекта, является отсутствие системного подхода при выработке и принятии решений, что обуславливает низкие либо не прогнозируемые результаты проекта. При этом на всех шагах проекта имеет место неравенство:  $p_1(k) > p_2(k) > p_3(k) > p_4(k) > p_5(k)$  (рис. 3).

Сопоставление рассмотренных выше двух вариантов проектов, имеющих различные степени совершенства, приведено на рис. 4. Полученные результаты показывают, что рассмотренные проекты имеют различные распределения вероятностей состояний успешности проектов.

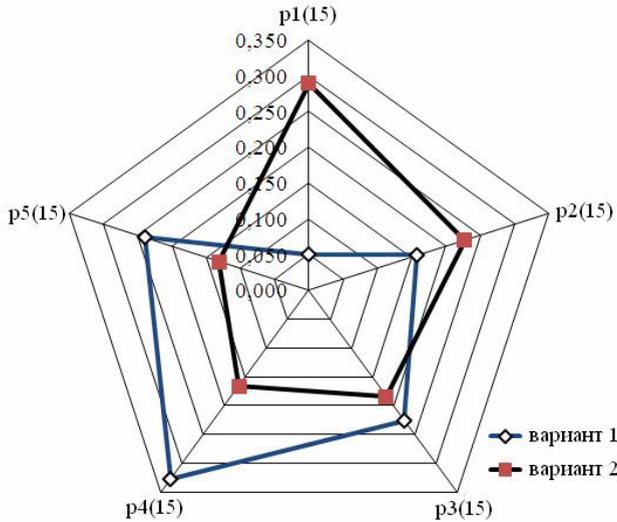


Рис. 4. Сопоставление характеристик риска для вариантов проектов

Принимая во внимание, что риск проекта может быть определен как произведение стоимостного выражения ущерба из-за некоторого негативного события и вероятности наступления этого события можем записать

$$R_1^{(1)} \pi_{ij} \{i = \overline{1,5}; j = \overline{1,5}\}; k = 15) = \sum_{i=1}^5 z_i \cdot^{(1)} p_i(k = 15), \quad (9)$$

$$R_2^{(2)} \pi_{ij} \{i = \overline{1,5}; j = \overline{1,5}\}; k = 15) = \sum_{i=1}^5 z_i \cdot^{(2)} p_i(k = 15), \quad (10)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – величина риска, соответственно, первого и второго проектов на шаге  $k = 15$ ;

$z_i$  – стоимостное выражение ущерба в определенных состояниях успешности как степени совершенства проектов,  $i = 1 \dots 5$ .

Примем в первом приближении соотношения между величинами стоимостного выражения ущерба, характерным для каждого состояниях успешности как степени совершенства проектов

$$\begin{aligned} z_2 &= 2 \cdot z_1, \\ z_3 &= 3 \cdot z_1, \\ z_4 &= 4 \cdot z_1, \\ z_5 &= 5 \cdot z_1. \end{aligned}$$

Подставляя эти значения в (9) и (10) получим

$$R_1 = 2,45 \cdot z_1;$$
$$R_2 = 3,38 \cdot z_1.$$

Разность  $\lambda = R_1 - R_2 < 0$ , что фактически означает получение “ущерба” при выполнении проекта по варианту 2. Поэтому можно считать доказанным утверждение проф. Ю.Л. Воробьева “Ожидаемые выгоды и реальные потери в проектах пропорциональны уровню риска.”

**Выводы.** Получила дальнейшее развитие на основе предложенной в статье доказательной базы научная составляющая теории проектного менеджмента в форме закона, сформулированного проф. Ю.Л. Воробьевым – закона контроля параметров риска проектов.

Поскольку уровень научных знаний в любой сфере человеческой деятельности определяется степенью абстрагирования знаний, выражаемой в форме законов, то дальнейшие исследования должны быть ориентированы на выявление и обоснование других гипотез, аксиом, правил и законов проектной деятельности.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Руденко С.В. Оценка экологической безопасности в проектах [Текст]: Монография / С.В. Руденко, В.Д. Гогунский. – Одеса: Фенікс, 2006. – 144 с.
2. Бушуев С.Д. Напрями дисертаційних наукових досліджень зі спеціальності «Управління проектами та програмами» [Текст] / С.Д. Бушуев, В.Д. Гогунський, К.В. Кошкін // Управління розвитком складних систем. – 2012. – № 12. – С. 5-7.
3. Бушуев С.Д. Развитие систем знаний и технологий управления проектами [Текст] / Управление проектами / С.Д. Бушуев. – М.: Изд. дом «Гребенникова», 2005. – № 2(2). – С. 18-24.
4. Гогунский В.Д. Основные законы проектного менеджмента [Текст] / В.Д. Гогунский, С.В. Руденко // IV міжнар. конф.: “Управління проектами: стан та перспективи”. – Миколаїв: НУК, 2008. – С. 37-40.
5. Вайсман В.А. Теория проектно-ориентированого управления: обоснование закона Бушуева С.Д. [Текст] / В.А. Вайсман, В.Д. Гогунский, С.В. Руденко // Зб.: Наук. записки Міжнар. гуманітарного ун-ту. – Одеса: МГУ, 2009. – С. 9-13.
6. Бондарь В.И. Проявление закона Кошкина К.В. в безнадежных проектах: признаки, свойства, результаты [Текст] / В.И. Бондарь, В.Д. Гогунский // V міжнар. конф.: “Управління проектами: стан та перспективи”. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 111-112.

7. Гогунский В.Д. Обоснование закона о конкурентных свойствах проектов [Текст] / В.Д. Гогунский, С.В. Руденко, П.А. Тесленко // Управління розвитком складних систем. – Вип. 8. – К.: КНУБА, 2012. – С. 14-16.
8. Тесленко, П.А. Стратегия и тактика развития проектов на основе закона Тернера-Руденко [Текст] / П.А. Тесленко // Управління проектами та розвиток виробництва: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2009. – № 1(29). – С. 98-105.
9. Методичні рекомендації „Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря” [Електронний ресурс]. – Затв. наказом МОЗ України 13.04.2007 р. № 184. – <http://ua-info.biz/legal/baseuw/ua-qmwote/index.htm>
10. Басиль Е.Е. Риск сокращения продолжительности жизни: рабочая зона / Е.Е. Басиль, С.А. Изотов, В.Д. Гогунский // Труды Одес. политехн. ин-та. – Вип. 2. – 1997. – С. 133-135.
11. ДСТУ-П IWA 2:2007. Настанови щодо застосування ISO 9001:2000 у сфері освіти (IWA 2:2003, IDT). – К.: Держспоживстадарт, 2008. – 60 с. (Чинний від 2008-01-01).
12. Розробка марківської моделі зміни станів пацієнтів в проектах надання медичних послуг [Текст] / С.В. Руденко, М.В. Романенко, О.Г. Катуніна, К.В. Колеснікова // Управління розвитком складних систем. – № 12. – 2012. – С. 86-89.
13. Колеснікова К.В. Розробка марківської моделі станів проектно керованої організації [Текст] / К.В. Колеснікова, В.О. Вайсман, С.О. Величко // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Вип. 7. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 217-222.
14. Оборская А.Г. Модель эффектов коммуникаций для управления рекламными проектами [Текст] / А.Г. Оборская, В.Д. Гогунский // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 31-34.
15. Гогунский В.Д. Разработка моделей коммуникаций в рекламных проектах [Текст] / В.Д. Гогунский, А.Г. Оборская // Наук. вісник міжнар. гуманітарного ун-ту. – № 1. – Одеса: МГУ, 2010. – С. 48-53.
16. Яковенко В.Д. Прогнозування стану системи керування якістю навчального закладу [Текст] / В.Д. Яковенко, В.Д. Гогунський // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2009. – № 2. – С. 50-57.

Стаття надійшла до редакції 19.09.2013

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, директор Науково-дослідного інституту фундаментальних та прикладних досліджень Одеського національного морського університету **С.В. Руденко**

УДК 008.5

Е.С. Руденко

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ ОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ПОРТОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*В статье анализируются факторы опасности, возникающие при эксплуатации объектов портовой инфраструктуры. Предложен подход к оценке параметров, характеризующих эти факторы, которые оказывают влияние на вероятность возникновения аварийных ситуаций на объектах портовой инфраструктуры.*

**Ключевые слова:** классификация, оценка, система, факторы опасности, параметры.

*У статті аналізуються фактори небезпеки, що виникають при експлуатації об'єктів портової інфраструктури. Запропоновано підхід до оцінки параметрів, що характеризують ці фактори, які впливають на ймовірність виникнення аварійних ситуацій на об'єктах портової інфраструктури.*

**Ключові слова:** класифікація, оцінка, система, фактори небезпеки, параметри.

*The paper analyzes the hazards arising in the operation of port infrastructure. Proposed an approach to estimating parameters characterizing these factors that influence the probability of occurrence of emergency situations at the port infrastructure.*

**Keywords:** classification, evaluation, system, risk factors, parameters.

**Постановка проблемы в общем виде.** Человечество на протяжении истории своего развития постоянно сталкивается с различными видами опасности (природными, экономическими, социальными, техногенными, политическими, военными и др.). И если в начале своего развития основная опасность для человечества имела природный характер, то по мере его развития стали появляться новые виды опасностей и, прежде всего, техногенная, связанная с научно-техническим прогрессом.

Определим, как основную опасность для объектов портовой инфраструктуры явление техногенной природы способное нанести вред объекту портовой инфраструктуры, окружающей среде либо персоналу порта. Данный вид опасности связан с производственными процессами, происходящими на объектах портовой инфраструктуры, и характеризуется набором возможных факторов или причин вызывающих ее проявление, которые как правило, носят потенциальный характер. Наличие факторов опасности создает лишь возможность возникновения аварийной ситуации на объектах портовой инфраструктуры.

Под аварийной ситуацией (АС) в морском порту будем понимать состояние объекта инфраструктуры, характеризующееся нарушением условий его безопасной эксплуатации, но еще не перешедшее в аварию, когда все неблагоприятные факторы опасности для людей, окружающей среды и сам объект можно удержать в приемлемых пределах посредством управляющих решений [1].

На основании оценок факторов опасности можно определить вероятность возникновения аварийной ситуации, которая при определенном стечении обстоятельств может перерасти в аварию.

Авария – важнейшее понятие безопасности человеческой деятельности, именуемое и характеризующее последствия реализации одной из основных опасностей техники и технологии (так называемой техно-сферы) – разрушения объекта или нарушения процесса.

Авария в морском порту определяется как опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению зданий, сооружений, повреждению оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, а также к нанесению ущерба окружающей природной среде [1].

**Цель статьи.** Идентификация и классификация факторов опасности на объектах портовой инфраструктуры, которая позволит в дальнейшем определить вероятность возникновения аварийных ситуаций на этих объектах.

**Идентификация опасностей и выявление аварийных ситуаций на объектах инфраструктуры порта.** Береговые предприятия морехозяйственного комплекса, в частности, морские порты, в соответствии с положением ДБН А.2.2-1-95 попали в перечень видов деятельности и объектов, представляющих повышенную опасность.

Известные методы оценки риска [2-5] делают акцент на составляющую последствий возможных аварий и соответствующие меры по снижению возможного ущерба. Однако мероприятиям по предотвращению самих аварий уделяется не так много внимания, что связано, главным образом, с трудностями оценки вероятности возникновения соответствующих аварийных ситуаций.

Основными причинами возникновения аварийных ситуаций в морских портах, являются нарушения регламента технологических процессов, технические ошибки обслуживающего персонала, нарушение противопожарных правил и техники безопасности, отключение систем энергоснабжения, водоснабжения, водоотведения, стихийные бедствия, террористические акты и т. п.

В связи с этим возникает задача многофакторного анализа вероятности возникновения АС на объекте инфраструктуры на основе системного анализа и методологии построения систем поддержки принятия решений. Это позволило бы принимать решения по снижению вероятно-

сти возникновения АС на основе данных о технологических процессах на объекте в условиях влияния факторов опасности различной природы.

В отсутствии достаточного объема статистической информации о влиянии отдельных факторов на вероятность возникновения АС возможно использование метода экспертных оценок на базе нечетких множеств. Выделяют два уровня использования экспертных оценок: качественный и количественный. На качественном уровне определяются возможные сценарии развития опасной ситуации из-за отказа системы, выбор окончательного варианта решения и др. Точность количественных (балльных) оценок зависит от научной квалификации экспертов, их способностей оценивать те или иные состояния, явления, пути развития ситуации. Для анализа различных источников опасности в портах методы на основе экспертных оценок могут использоваться для построения сценариев развития аварий, связанных с отказами технических средств, оборудования и установок; для ранжирования источников опасности.

Основные задачи этого этапа – выявление и четкое описание всех источников опасностей на объектах портовой инфраструктуры и возможных аварийных ситуаций при его эксплуатации. Это ответственный этап анализа, так как не выявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению и исчезают из поля зрения. При идентификации следует определить, какие элементы, технические устройства, технологические блоки или процессы в технологической системе требуют более серьезного анализа и какие представляют меньший интерес с точки зрения безопасности. Результатом идентификации опасностей являются: перечень нежелательных событий; описание источников опасности, факторов риска, условий возникновения и развития нежелательных событий (например, сценариев возможных аварий); предварительные оценки опасности и риска.

Идентификация опасностей завершается также выбором дальнейшего направления деятельности. В качестве вариантов дальнейших действий может быть: решение прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей или достаточности полученных предварительных оценок; решение о проведении более детального анализа опасностей и оценки риска; выработка предварительных рекомендаций по уменьшению опасностей.

Выстраиванию причинной цепи предпосылок аварии способствуют факторы опасности, обусловленные ошибками персонала, отказами оборудования и нерасчетными внешними воздействиями со стороны рабочей и внешней среды.

Сценарии или ситуации вообще, а аварий в частности, представляют собой научный вымысел, который позволяет авторам рассматривать элементы системы так «как если бы» они заданным образом функционировали в реальности. Сценарии не проверяют предположения (гипотезы), а скорее позволяют исследовать возможные результаты, если предположения (гипотезы) оказываются верны. Сценарии – это по сути дела про-

гнозы, основанные на так называемом здравом смысле и опирающиеся на эмпирические данные науки. Каждый сценарий воплощает в себе логически построенную модель потенциального будущего, «степень уверенности» в отношении тенденций развития которого и достигнутых результатов остается неопределенной.

В зависимости от назначения объекта портовой инфраструктуры различают различные типы аварий, характерные для этого объекта. Ниже представлен примерный перечень аварий, которые могут произойти на производственных объектах портовой инфраструктуры при их эксплуатации.

При эксплуатации причалов с опасными грузами: взрывы, загорания и (или) выбросы опасных веществ; разрушения сооружений, технических устройств или их элементов, разливы нефти на акватории морского порта и т.д.

При эксплуатации перегрузочной техники: разрушение или излом металлоконструкций грузоподъемной машины (портала, рамы, платформы, башни, стрелы порталного крана, опоры), вызвавшие необходимость в ремонте металлоконструкций или замене их отдельных секций, а также падение грузоподъемной машины, вызвавшее указанные разрушения; разрушение или повреждение металлоконструкций (изгиб, деформация) подъемных сооружений (или их элементов), приведшее к травмированию людей.

При эксплуатации объектов теплоснабжения: разрушения и повреждения (разрывы) котлов, сосудов, работающих под давлением, трубопроводов пара и горячей воды (их элементов).

При эксплуатации объектов газоснабжения: разрушения газопроводов, выход из строя газового оборудования газораспределительных пунктов и газораспределительных установок, повлекших за собой взрывы газа в административно-бытовых зданиях, инженерных сооружениях, а также остановку (перерыв) газоснабжения порта, взрывы и пожары, связанные с эксплуатацией портового газового хозяйства, газонаполнительных и автозаправочных станций сжиженных газов, взрывы газа в газифицированных печах, топках и газоходах котлов, агрегатах, вызвавших их местные разрушения или отключения; повреждения подземных газопроводов (механические, коррозионные и др.).

**Классификация факторов опасности. Выбор и преобразование параметров факторов опасности.** Выбор и преобразование параметров факторов опасности. По своей природе факторы опасности, возникающие при эксплуатации объектов инфраструктуры морского порта, можно разделить на факторы технического состояния объекта, технологические, внешний (окружающей среды) и человеческий (рис.1).

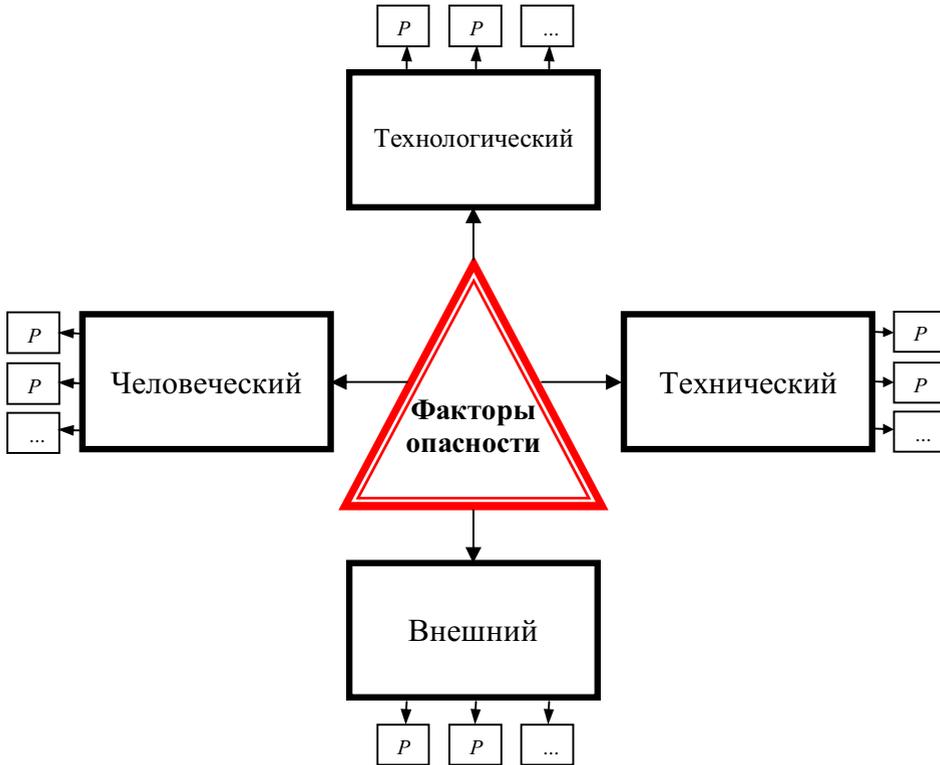


Рис. 1. Факторы опасности

В общем виде фактор опасности является функцией от ряда параметров ( $p_{ni}$  –  $i$ -й параметр  $n$ -го фактора), которые могут быть измеряемыми (количественными) и не поддающимися непосредственному измерению (качественными), представленные в виде текстового описания и экспертных оценок.

Технологический фактор характеризует технологический процесс. Машины и механизмы, участвующие в технологическом процессе, представляют собой весьма сложные объекты, состоящие из многих взаимосвязанных элементов различной конструкции и принципов действия: металлические конструкции, несущие и тяговые органы, механические передачи, двигатели, электрические и гидравлические системы. Вновь изготовленная машина, механизм обладают определенным запасом надежности. В процессе эксплуатации надежность изменяется.

При работе машины и механизмы испытывают различные внешние воздействия, которые могут быть разделены на субъективные и объективные. Под воздействиями внешнего характера в узлах и механизмах машины происходят изменения, приводящие к их отказам, т. е. к прекращению использования машины, что следует из определения.

Качественные параметры, входящие в технологический фактор должны оцениваться, принимая во внимание следующее:

- соответствие применяемой технологии используемым техническим средствам и организации;
- соответствие применяемой технологии уровню мировых достижений;

Количественные параметры технологического процесса выбираются, исходя из:

- соответствия технологических параметров допустимым;
- соответствия применяемой технологии фактическим погодным условиям, в том числе экстремальным и др.;

Фактор технического состояния объектов портовой инфраструктуры, который тем или иным образом может влиять на возникновение аварийной ситуации, учитывается, принимая во внимание следующее:

на недвижимых объектах (акватория, подходной канал, гидротехнические сооружения, железнодорожные и автомобильные пути, линии связи, средства связи, тепло-, газо-, электро- и водоснабжения)

- соответствие объекта стандартным требованиям;
- уровень технического состояние объекта или его отдельных конструктивных элементов стандартным требованиям;
- на движимых объектах (подъемно-транспортное оборудование, буксиры и другие суда портового флота);
- уровень качества работы подъемно-транспортного оборудования, технических устройств или отдельных узлов.

– соответствие оборудования (судов) уровню мировых достижений;

– соответствие применяемой техники фактическим погодным условиям, в том числе экстремальным;

на других объектах портовой инфраструктуры (средства навигационного оборудования и управления движением судов, информационные системы;

- качественный уровень работы ПРДС, связи и др.

Внешний фактор опасности характеризуется наличием форс-мажорных обстоятельств и учитывается, принимая во внимание следующее:

- сложность погодных условий;
- видимость;
- ледовую обстановку;
- землетрясения;
- пиратства и т.п.

Человеческий фактор учитывается, принимая во внимание следующее:

- соответствие количественного и профессионального уровня исполнителей работ технологическим требованиям и используемой технике;
- четкость, своевременность и однозначность уровня управления;
- человеческий фактор в управлении (образование, воспитание, профессионализм, физическое состояние, приверженность к безопасной работе и т.п.);

Значения количественных параметров  $p_i$  преобразуем в безразмерную величину  $q_i$ , которая характеризует степень отклонения значения параметра от нормативного (рис.2).

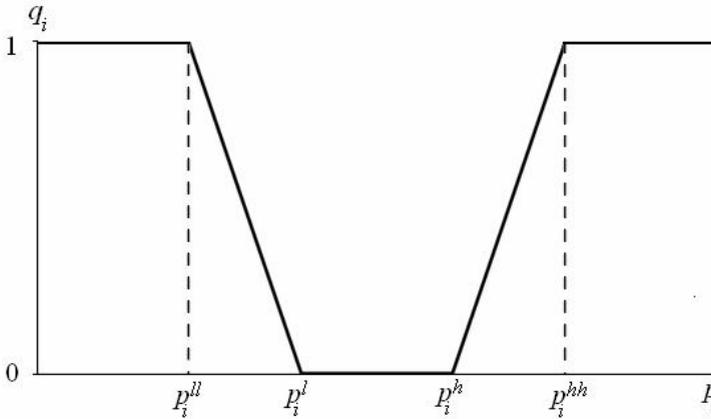


Рис. 2. Зоны опасных значений параметра  $p_i$

$$q_i = \begin{cases} 1, \text{ если } p_i \leq p_i^{ll} \\ \frac{p_i^l - p_i}{p_i^l - p_i^{ll}}, \text{ если } p_i^{ll} < p_i < p_i^l \\ 0, \text{ если } p_i^l \leq p_i \leq p_i^h \\ \frac{p_i - p_i^h}{p_i^{hh} - p_i^h}, \text{ если } p_i^h < p_i < p_i^{hh} \\ 1, \text{ если } p_i \geq p_i^{hh} \end{cases}$$

где  $p_i$  – текущее значение параметра;

$p_i^l, p_i^h$  – предупредительные значения параметра;

$p_i^{ll}, p_i^{hh}$  – предельно допустимые значения параметра.

Качественные параметры  $p_i$  могут быть представлены в виде текстового описания или экспертных оценок. В любом из этих случаев параметру с помощью экспертов также необходимо присвоить количественную оценку в диапазоне от 0 до 1.

**Выводы.** Приведенная в статье классификация факторов опасности при эксплуатации объектов инфраструктуры, выбор и преобразование параметров, характеризующих эти факторы, позволит в дальнейшем разработать методику оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций на территории и акватории морских портов, а также оценивать возможные риски.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Маруніч А.А., Подруцкий А.А., Дубов Ю.Н. *Управление безопасностью объектов морехозяйственного комплекса [Текст]: Пособие / Маруніч А.А., Подруцкий А.А., Дубов Ю.Н.* – Одесса: Друк, 2006. – 383 с.
2. ИСО/МЭК 31010:2009 (ISO/IEC 31010:2009) *Управление рисками: методики оценки потенциальных рисков (Risk management - Risk assessment techniques).*
3. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О., Куксова В.И. *Идентификация определяющих параметров угроз, уязвимости и защищенности критически важных объектов по отношению к превалирующим угрозам природного, техногенного и террористического характера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.* – М.: ВИНТИ, 2008. – № 2. – С. 70-77.
4. Махутов Н.А. *Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования.* – Новосибирск: Наука, 2008. – 522 с.
5. Baker J., Schubert M, Faber M. *On the assessment of robustness / Structural Safety.* – 30 (2008). – P. 253-267.

*Стаття надійшла до редакції 20.10.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Управління системами безпеки життєдіяльності» Одеського національного політехнічного університету **В.Д. Гогунський**

УДК 656.615.078.111 / 117: 656.07

А.О. Мурадян

**ОБГРУНТУВАННЯ ПІДХОДУ ДО ПОСТАНОВКИ ЗАВДАННЯ  
УПРАВЛІННЯ ВЗАЄМОДІЄЮ СУМІЖНИХ ПІДПРИЄМСТВ  
МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ ВУЗЛІВ**

*У статті досліджуються найбільш привабливі концепції розробки механізму взаємодії підприємств мультимодальних транспортно-логістичних вузлів на етапі управління перевалкою вантажів у якості безперервного розгалуженого процесу зі змінною структурою. Показано, що для постановки адекватного цьому процесу завдання управління, необхідно використовувати методологію організації узгодження рішень, що відповідає потребам управління виробничо-економічними системами.*

**Ключові слова:** мультимодальні перевезення, процес перевалки вантажів, транспортно-логістичні вузли, взаємодія транспортних підприємств, узгоджене управління взаємодіючими підприємствами.

*В статье исследуются наиболее привлекательные концепции разработки механизма взаимодействия предприятий мультимодальных транспортно-логистических узлов на этапе управления перевалкой грузов, трактуемой в качестве непрерывного разветвленного процесса с переменной структурой. Показано, что для постановки адекватной этому процессу задачи управления, необходимо использовать методологию организации согласования решений, отвечающую потребностям управления производственно-экономическими системами.*

**Ключевые слова:** мультимодальные перевозки, процесс перевалки грузов, транспортно-логистические узлы, взаимодействие транспортных предприятий, согласованное управление взаимодействующими предприятиями.

*The most attractive conceptions of the mechanism of enterprises co-operation in multimodal transport-logistics knots are investigated in this article on the stage of management the trans-shipment of cargoes, interpreting as a continuous process with a variable structure. The variants of setting the task adequate this process of management and oriented to the construction of single ("global") models are approved to be in practice with little perspective. In this connection the methodology of modern theories of management co-ordination of difficult production economic systems is suggested to be used for this task*

**Keywords:** delivery of cargoes, multimodal transportations, process of cargoes trans-shipment, transport-logistics knots, co-operation of transport enterprises, concerted management of interactive enterprises.

**Постановка проблеми.** Одним з основних елементів транспортних систем будь-якого рангу є пункти передачі вантажів з одного виду транспорту на інший – морські і річкові порти, автономні вантажні термінали на морських узбережжях, залізничні вантажні станції і вантажні двори автотранспортних підприємств. Через спільність функціонального призначення і структурної ідентичності виробничого процесу перерахованих підприємств їх запропоновано в [1] називати вантажо-перевалювальними системами відповідних видів транспорту. Представляється логічним розповсюдити це збірне найменування і на різні поєднання перерахованих підприємств у складі комплексних систем, що іменуються нині мультимодальними транспортно-логістичними вузлами (МТЛВ), а в колишні часи тих, що носили назви: перевалочних пунктів і вузлів; транспортних вузлів на базі залізничних станцій, морських і річкових портів; загальнотранспортних вузлів; мультимодальних транспортних вузлів.

Далі зосередимо увагу на класі МТЛВ, характерних для національної транспортної системи України, тобто враховуватимемо, що в більшості вузлів вказаного класу взаємодія суміжних видів транспорту здійснюється найактивніше в таких системах як: морські судна-морський порт-рухомий склад залізничного транспорту-припортова залізнична станція (і назад); морські судна-морський порт-магістральний автотранспорт (і назад); морські судна-морський порт-річкові судна (і назад). Також враховуватимемо, що у взаємодію на інформаційному рівні до МТЛВ залучаються разом з транспортними підприємствами також відправники (продавці) і одержувачі (покупці) вантажів, компанії – власники транспортних засобів, експедиторські, агентські і брокерські компанії, а також фіскальні і інші організації.

Усе викладене вище переконливо свідчить про те, що МТЛВ відіграють дуже помітну роль у здійсненні змішаних (мультимодальних і інтермодальних) вантажних перевезень. Про це свідчить передусім той факт, що більше половини часу транспортування вантажів доводиться на їх перебування під навантажувально-розвантажувальними операціями в пунктах навантаження, розвантаження і перевалки [2]. При цьому витрати по вказаних операціях приблизно в 4 рази перевищують витрати на вантажні перевезення магістральним транспортом [3].

Головна причина відзначених 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 МТЛВ. Саме з цієї причини з'являються "кинуті" потяги на залізничних полігонах, що тяжіють до морських портів, введення конвенційних заборон і часткових обмежень на відвантаження на адресу портів масових вантажів, простої суден, вагонів і автомобілів з вантажами і в очікуванні вантажів, накопичення в портах незатребуваних вантажів. У результаті практично усі учасники логістичного ланцюга доставки вантажів і транспортного

обслуговування несуть втрати, вимірювані в сукупній оцінці семизначними цифрами [4].

З вищевикладеного становиться очевидним, що МТЛВ являються, як сказано в [3], "самою останньою" можливістю якщо не для ліквідації, то хоча б для часткового усунення "движенческих" диспропорцій в роботі суміжних видів транспорту. Саме така орієнтація приймається як ключова початкова передумова постановки, винесеного в назву цієї статті завдання.

**Огляд основних досліджень і публікацій.** Представляється доречним підкреслити, що досліджуване нами завдання є серцевиною теорії забезпечення ефективної взаємодії суміжних видів транспорту в МТЛВ, зародження якої відноситься до середини XIX століття і пов'язане з іменами видатних російських інженерів і вчених залізничного транспорту П.П. Мельникова і В.Є. Тимонова [5], які виступали за створення гармонійно розвиненої і раціонально використовуваної загальнодержавної транспортної системи країни. При цьому вони особливо підкреслювали актуальність проблеми управління взаємодією залізниць і морських портів при здійсненні процесу перевалки вантажів.

Ідеї П.П. Мельникова і В.Є. Тимонова отримали ґрунтовне опрацювання в 1930-1950-ті роки завдяки дослідженням радянських учених-транспортників В.Н. Образцова і В.В. Звонкова, які у [6, 7] відкрили шлях до рішення на рівні МТЛВ таких завдань, як: поєднання часу прибуття до вузлів рухомого складу взаємодіючих видів транспорту; скорочення термінів перебування у вузлах вантажів і транспортних засобів; впровадження єдиного технологічного процесу роботи портів і припортових залізничних станцій. У результаті до 1970-х років було запропоновано розглядати МТЛВ в якості міжгалузевих систем з територіальним поєднанням транспортного виробництва на основі злиття в єдиному процесі технологічних процесів взаємодіючих підприємств і використання для його реалізації оперативно об'єднаних технічних і трудових ресурсів цих підприємств, що цілком відповідало філософії централізованої економіки [3].

Далі послідував логічний висновок про необхідність розробки теорії і методів управління МТЛВ як відносно автономними транспортними системами. Спочатку (у 1950-1960 рр.) в цьому напрямі переважали постановочні і частенько декларативні виступи з приводу доцільності здійснення управління МТЛВ з єдиного загальновузлового центру з вищим організаційно-правовим статусом по відношенню до твірних МТЛВ підприємств. Проте ця ідея визнання не отримала через галузеву роз'єднаність видів транспорту. На противагу їй затвердилася інша точка зору, що передбачає реалізацію управління МТЛВ на принципах колегіальності і співпраці.

Ця концепція була покладена в основу розробки проекту комплексу завдань "Безперервний план-графік роботи транспортного вузла" (БПГРТВ), впровадженого у ряді МТЛВ на базі морських портів в 1970-ті

роки в якості ядра першої черги автоматизованої системи управління МТЛВ [8]. Проте цей задум не здійснився у зв'язку з припиненням в СРСР на початку 1980-х років робіт по автоматизації управління в народному господарстві.

У наступне тридцятиріччя, наскільки можна судити по публікаціях у транспортній літературі, "проривних" досягнень у дослідженні комплексних транспортних проблем, у тому числі пов'язаних із забезпеченням управління взаємодією суміжних підприємств в МТЛВ, не спостерігалось ні в нашій країні, ні за кордоном. Ознаки активізації в цій галузі транспортної науки з'явилися на початку поточного століття, коли українські і російські вчені, головним чином залізничного транспорту, почали розглядати проблеми взаємодії суміжних видів транспорту через призму логістичної концепції доставки вантажів "від дверей вантажовідправника до дверей вантажоодержувача".

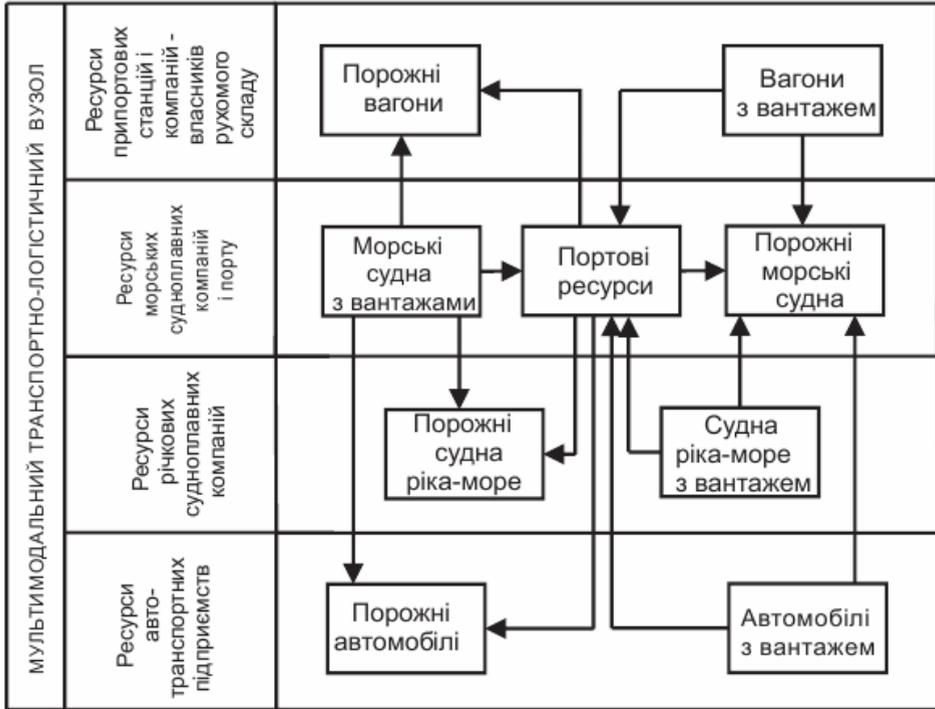
Ознайомлення з опублікованими результатами досліджень в цьому напрямі, у тому числі з проблеми взаємодії суміжних підприємств МТЛВ (див., наприклад, [9, 10, 11]), показують, що для них характерна загальна особливість, яка полягає в тому, що транспортні вузли розглядаються, як і раніше, в якості загальнотранспортних підприємств. Між тим, як вже відзначалося вище, це допущення не можна визнати спроможним внаслідок того, що МТЛВ не є єдиними в організаційно-правовому сенсі системами і, внаслідок цього, не можуть мати виробничих підрозділів із загальновузловими функціями і ресурсами, у тому числі перевантажувальними.

В той же час у згаданих і інших публікаціях привертають увагу спроби сучасних авторів застосувати для дослідження питань обґрунтування механізму управління взаємодією суб'єктів МТЛВ формальний інструментарій, що раніше не використовувався для цієї мети, запозичений з наук, об'єднаних в теорії транспортно-логістичного проектування і управління [12]. Проте і зараз правомірно стверджувати, що питання про незавершеність дослідження теоретичних основ управління МТЛВ, продовжує залишатися відкритим.

**Завдання дослідження.** З вищевикладеного можна зробити висновок, що в змальованій ситуації подальше просування у вивченні механізму управління взаємодією суміжних підприємств МТЛВ слід зв'язувати з двоєдиною метою: з одного боку, удаватися до коректної адаптації отриманих раніше результатів до умов роботи транспорту в ринковому середовищі і, з іншого боку, шукати принципово нові рішення для рівня МТЛВ у рамках завдання оптимального управління процесом перевалки вантажів (ППВ), починаючи з обґрунтування передумов постановки цього завдання з позиції системного підходу до дослідження процесів управління.

**Основний матеріал дослідження.** З аналізу виробничої суті ППВ виходить, що цей процес можна розглядати в якості різновиду безперервних розгалужених процесів із змінною структурою [13, 14], що

ілюструється приведеною на рис.1 схемою, яка відповідає різновиду МТЛВ, утворених сукупностями підприємств чотирьох видів транспорту – морського, залізничного, річкового і автомобільного.



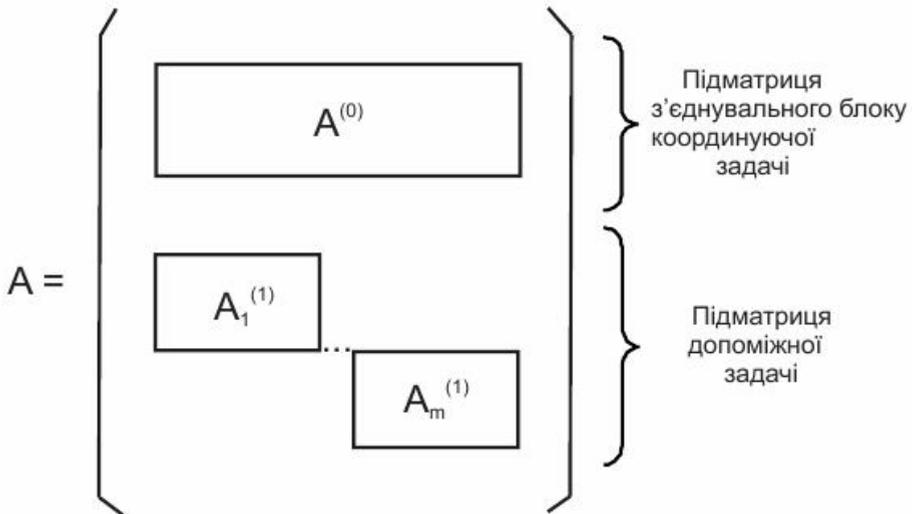
*Рис.1. Структурна схема процесу перевалки вантажів в МТЛВ*

З аналізованої схеми видно, що при реалізації ППВ відбувається безперервне перетворення (переміщення в просторі) вантажопотоків – що входять до МТЛВ і ті, що виходять з нього – за допомогою дії на них виробничих ресурсів підприємств вузла. Комплекс цих ресурсів утворюють: на припортовій залізничній станції – магістральний рухомий склад, шляхи і маневрові тепловози; у порту – причальний фронт, вантажні фронти, складські місткості і площі, службово-допоміжний флот; на підході до порту і в порту – морські і річкові судна, залізничні вагони і магістральні автомобілі. При цьому результати дії ресурсів на вантажопотоки проявляються у формі переміщення певних кількостей вантажів з деяких початкових станів в деякі проміжні і кінцеві стани.

З аналізу об'єднаної структури ППВ і МТЛВ можна, зокрема, зробити висновок, що в основу постановки завдання управління взаємодією суміжних підприємств транспортного вузла допустимо покласти, як це було зроблено у [15], теоретичну схему блокового програмування у поєднанні з методом декомпозиції Данцига-Вульфа [16].

Привабливість цієї ідеї полягає в тому, що блокове програмування правомірно застосовувати для вирішення завдань лінійного програмування великої розмірності ("глобальних" завдань), які природно піддаються декомпозиції (розкладанню) на комплекси завдань істотно меншої розмірності ("локальних" завдань), сукупна реалізація яких призводить до еквівалентного рішення початкової "глобальної" задачі. У випадку з МТЛВ "локальні завдання" виділяються очевидним чином – по видах транспорту, що взаємодіють у вузлі, і по етапах переміщення вантажів.

При використанні методу Данцига-Вульфа модель початкового "глобального" завдання перетворюється з метою виділення основного (що координує) завдання і комплексу "локальних" завдань, що об'єднуються в структуру допоміжного завдання. Ця система завдань вирішується за умови, що матриця початкового завдання  $A$  містить в собі підматриці координуючого завдання  $A^{(0)}$  і допоміжного завдання  $A^{(1)}$ , що має блоково-діагональну структуру. При цьому підматриця  $A^{(0)}$  відповідає обмеженням по загальних для початкового "глобального" завдання ресурсах, відіграючи роль єднальних для нього умов, а в блоках підматриці допоміжного завдання ( $A_1^{(1)} \dots A_m^{(1)}$ ) формуються обмеження по власних ресурсах "локальних" завдань, що показано на рис.2.



*Рис.2. Принципова схема завдання блокового програмування*

Легко бачити, що охарактеризована логіка моделювання формально прикладена до завдання управління взаємодією суміжних видів транспорту в МТЛВ. На це було звернено увагу в [16] при описі, як вказано в цьому джерелі, "математичної моделі і методу оптимального планування і управління взаємодією різних видів транспорту в загальнотранспортному вузлі". Ознайомлення з цією публікацією показує, що в основу постановки охарактеризованого в ній завдання управління загаль-

нотранспортним вузлом (МТЛВ в наших позначеннях) були покладені три умови: по-перше, функціонування вузла зв'язувалося із здійсненням сукупності галузевих (по видах транспорту) технологічних операцій як єдиного процесу; по-друге, вважалося, що цей процес реалізується з використанням виробничих ресурсів, одна частина яких закріплюється за видами транспорту і може використовуватися для здійснення тільки "своїх" галузевих операцій, а іншу частину утворюють загальновузлові ресурси, застосовні для реалізації будь-якої з виконуваних у вузлі технологічних операцій; по-третє, передбачалося, що рішення задачі полягає в пошуку такого розподілу загальновузлових виробничих ресурсів між видами транспорту при дотриманні обмежень, що накладаються, яке забезпечує мінімум експлуатаційних витрат по МТЛВ в цілому.

Як бачимо, викладена в [15] постановка завдання, цілком "вписується" в схему приведену на рис. 2 моделі блокового програмування. Дійсно, в підматриці координуючого завдання  $A^{(0)}$  відбиваються загальновузлові параметри моделі (по виробничих ресурсах, показниках роботи МТЛВ та ін.), а в підматриці допоміжного завдання (у блоках  $A_1^{(1)} \dots A_m^{(1)}$ ) фіксується така ж інформація по видах транспорту, що взаємодіють у вузлі. Це говорить про коректність постановки завдання у формальному плані. Проте в змістовному відношенні висновок може бути протилежним через причини, відзначені вище, при характеристиці організаційно-правового статусу МТЛВ.

Зроблений висновок являється повністю справедливим у разі оперативного управління ППВ, реалізуемого у МТЛВ. Проте при плануванні і управлінні розвитком транспорту з позицій макроекономічного підходу, тобто в загальнодержавній постановці, модель блокового програмування на рівні МТЛВ є безумовно актуальною, на що абсолютно не звернено уваги в [15]. Наше твердження ґрунтується на тому факті, що при розробці стратегічних програм і проектів перспективного розвитку національної транспортної системи координуюче завдання моделі блокового програмування відповідає реально існуючим державним органам, які наділені правом виділяти інвестиції і інші ресурси на модернізацію транспортної галузі і визначати (задавати) виробничо-економічні параметри транспортних систем усіх рангів, у тому числі МТЛВ.

З аналізу структурної схеми МТЛВ у частині віддзеркалення в ній безлічі можливих варіантів реалізації ППВ витікає також, що цей процес можна представити у вигляді мережевої транспортної системи, тобто поставити йому у відповідність деякий орієнтований граф  $G = (I, J)$ , у якості вершин якого  $\{I\}$  виступатимуть позиції вантажопотоків (за їх місцезорозташуванням), а ребер  $\{J\}$  – організаційно-технологічні варіанти (ОТВ) переміщення вантажів в межах МТЛВ. При цьому вихідні позиції вантажопотоків фіксуватимуться очевидним чином: в морських і річкових судах – біля приймального буя, на рейді, біля причалів під вивантаженням і в очікуванні початку вивантаження, на перешвартовках; у залізничних вагонах – на припортовій станції (на шляхах – головному, при-

йомо-відправних, відстійних), на сполучних між портом і станцією шляхах; у порту – на виставкових шляхах, на вантажних фронтах під вивантаженням і в очікуванні вивантаження; у автомобілях – на транзитно-вантажних терміналах під митними формальностями, на вантажних фронтах під вивантаженням і в очікуванні вивантаження; у портових складах – на технологічному зберіганні, під логістичним обслуговуванням. Аналогічно фіксуються і кінцеві позиції вантажів – по порожніх суднах, вагонах, автомобілях і секціях портових складів, а також проміжні позиції – між зонами надходження вантажів до МТЛВ і убування їх з транспортного вузла.

Як відзначається в [17] і інших джерелах, конструйований таким чином орієнтований граф є дуже зручною моделлю, придатною для відображення безперервних виробничих процесів, до числа яких допустимо відносити і ППВ. Цей граф утворюється з сукупності елементів множини  $I$  з множиною  $J$  деяких впорядкованих пар  $i, j$ , узятих з  $J$ , де під впорядкованістю розуміється ребро, що сполучає елементи  $i$  та  $j$ . В результаті структура взаємодії елементів графа визначатиметься для кожного елемента  $i$  безліччю входів  $A(i)$  і безліччю виходів  $B(i)$ . При цьому в якості  $A(i)$  виступатиме безліч елементів, з яких виходять ребра, а в якості  $B(i)$  – безліч елементів, в які приходять ребра, що виходять з елементів  $i$ , тобто

$$A(i) = \{j \mid (i, j) \in J\}; \quad B(i) = \{j \mid (j, i) \in J\}. \quad (1)$$

У додатку до МТЛВ можна вважати, що ППВ в загальному випадку розпадається на деяку сукупність "елементарних" складових, тобто вантажних потоків, кожен з яких очевидним чином зв'язується з ребром графа, що веде з елемента  $i$  в елемент  $j$  і в кількісному відношенні характеризується величиною потоку вантажів по гілці  $Q_{ij}$  в одиницю часу. Називатимемо цю величину інтенсивністю вантажопотоків і враховуватимемо, що вона повинна задовольняти у будь-який момент часу  $t$  умові

$$Q_{ij}(t) \leq P_{ij}(t), \quad i = 1, m; \quad j = 1, n, \quad (2)$$

де  $P_{ij}(t)$  – пропускну спроможність гілки  $i$ - $j$  у момент часу  $t$ .

Поставимо у відповідність кожному елементу  $i \in I$  деяке ненегативне число  $P_i(t) \geq 0$  і назвемо його пропускну спроможністю елемента  $i$  у момент часу  $t$ . Очевидно, що ця величина лімітуватиме сумарний потік вантажів, що виходить з елемента  $i$  у будь-який момент часу, тобто

$$\sum_{j \in B(i)} Q_{ij} \leq P_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Усю безліч вершин  $I$  обговорюваного графа розділимо на чотири множини, що не перетинаються, в прив'язці до основних стадій ППВ:  $I_1$  – множина, що утворюється "джерелами" надходження вантажів до МТЛВ на морських і річкових суднах, в залізничних вагонах і

автомобілях;  $I_2$  – множина, що утворюється "споживачами" вантажів в МТЛВ, яким відповідають портові склади, а також порожній рухомий склад взаємодіючих видів транспорту;  $I_3$  – множина, що відповідає технічним засобам, які забезпечують переміщення вантажів у межах МТЛВ;  $I_4$  – множина, що відповідає оперативним зонам в порту і на припортовій станції, призначеним для короткострокового зберігання вантажів.

Для забезпечення вироблення дій на хід (режим) реалізації ППВ по усіх його стадіях і підпроцесах необхідно потоки, що виходять з елементів  $i \in I$ , зв'язати з потоками на вході і діями, що управляють, наступними співвідношеннями:

$$Q_{ij}(t) = f_{ij} [U_i(t), Q_{ki}(t); \forall k \in A_i]; \forall j \in B(i), \quad (4)$$

де  $U_i(t) = \{U_{i1}, \dots, U_{in}\}$  – вектор дій, що управляють, на ППГ;

$k$  – поточне значення ознаки ребра графа, через яке проходить вантаж.

Відзначимо, що діями  $U_i(t)$ , що управляють, регламентується напрям руху вантажопотоків через МТЛВ і визначається раціональна тактика використання виробничих ресурсів підприємств (рухомого складу, перевантажувальних засобів і складів порту, технічних засобів припортової станції), що взаємодіють у вузлі, для здійснення ППВ.

Область допустимих значень дій, що управляють, і потоків вантажів на вході і виході елементів  $i \in I_3$  задається обмеженнями

$$\left\{ U_i; Q_{ki}; \forall k \in A(i); Q_{ij}, \forall j \in B(i) \right\} \in V_i, \quad (5)$$

де  $V_i$  – деякі замкнуті області.

При цьому для будь-якого елемента  $i \in I_3$  повинне дотримуватися співвідношення

$$\sum_{k \in A(i)} Q_{ki}(t) - \sum_{j \in B(i)} Q_{ij}(t) \leq 0. \quad (6)$$

Очевидно, що в кожному елементі  $i$  (судні, вагоні, автомобілі, складі) у будь-який момент часу  $t$  може знаходитися певна кількість вантажів, що проходять через МТЛВ. Назвемо цю величину "поточним завантаженням" елемента і визначатимемо її з вираження

$$X_i(t) = \int_0^t \left[ \sum_{k \in A(i)} Q_{ki}(\tau) - \sum_{j \in B(i)} Q_{ij}(\tau) \right] d\tau + X_i(0), \quad (7)$$

де  $X_i(t)$  – "поточне завантаження" елемента  $i$  на початку періоду часу, що розглядається.

Зміна "поточного завантаження" елемента  $i$  у будь-який момент часу визначається величиною

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \sum_{k \in A(i)} Q_{ki}(t) - \sum_{j \in B(i)} Q_{ij}(t). \quad (8)$$

При цьому на об'єм "поточного завантаження" кожного елемента  $i$  необхідно накладати обмеження виду

$$0 \leq X_i(t) \leq W_i, \quad (9)$$

де  $W_i$  – деякі ненегативні величини, лімітуючі допустимі об'єми накопичення вантажів в елементах  $i$ .

Стосовно до структури орієнтованого графа, адекватного ППВ, співвідношення (8) для елементів  $i$  з безлічі  $I_1, I_2, I_4$  може бути записане наступним чином:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \begin{cases} -\sum_{i \in I_4} Q_{ij}(t) - \sum Q_{ik}(t), & \text{якщо } i \in I_1; \\ \sum_{i \in I_4} Q_{ji}(t) + \sum_{k \in I_3} Q_{ki}(t), & \text{якщо } i \in I_2; \\ \sum_{i \in I_4} Q_{ji}(t) - \sum_{i \in I_2} Q_{ij}(t) - \sum_{i \in A(i) \cap I_3} Q_{ij}, & \text{якщо } i \in I_4. \end{cases} \quad (10)$$

Система співвідношень (10) характеризує умову балансу, якого необхідно дотримуватись в МТЛУ при реалізації ППВ.

Сукупність співвідношень (2)-(7), (9)-(10) разом з системою початкових умов

$$X_i(0) = Q_i(0), \quad i \in I \setminus I_3 \quad (11)$$

описує стан графа і відповідний йому набір ОТВ реалізації ППВ у будь-який момент часу, тобто є математичною моделлю ППВ.

Мета рішення адекватного співвідношенням (2)-(7), (9)-(11) завдання полягає у виборі такого поєднання управляючих параметрів взаємодіючих у МТЛВ підприємств, яким фіксується безліч ОТВ перевалки вантажів, при використанні якого досягається максимально можлива ефективність грузоперевалочного процесу при дотриманні обмежень, що накладаються на нього. У ринкових умовах ефективність реалізації ППВ слід оцінювати за критерієм оптимальності, якому відповідає показник прибутку, отримуваному в результаті здійснення перевалки вантажів суміжними підприємствами, що взаємодіють у МТЛВ на деякому інтервалі управління  $T$ .

У математичній постановці таке завдання полягає в наступному: систему, що описується співвідношеннями (2)-(7), (9)-(11), перевести за час  $T$  з деякого стану  $X_i(0) = Q_i^0$  в початковий момент часу в заданий кінцевий стан

$$X_i(T) = Q_i^T, \quad i \in I \cup I_3 \quad (12)$$

так, щоб при цьому забезпечувався максимум функціонала  $F$

$$F = \int_0^T \left[ \sum_{i \in I_2} \sum_j a_{ij} Q_{ij} + \sum_{i \in I_1} \sum_j a_{ij} Q_{ij} - R(t) \right] dt, \quad (13)$$

де  $a_j$  – гарантований дохід за перевалку 1 т вантажу;

$a_i$  – прогнозная оцінка непланованого доходу за перевалку 1 т вантажу;

$R(t)$  – функція, що характеризує витрати по перевалці вантажів у поточний момент часу  $t$ .

Охарактеризована модель оптимізації управління ППВ повною мірою відповідає ідеї системного представлення досліджуваних процесів і в цьому сенсі може розглядатися в якості теоретично прийняттого результату, що має наукову новизну стосовно до МТЛВ. Проте в практичному відношенні цю модель неможна оцінити однозначно. З одного боку, гарантуючи максимум прибутку від реалізації ППВ по МТЛВ в цілому, (якщо з такою постановкою питання згодні усі учасники здійснення вантажоперевалки) вона забезпечує вичерпне рішення обговорюваної задачі. З іншого боку, при зацікавленості підприємств МТЛВ у досягненні тільки власної вигоди модель не може давати закінченого рішення задачі внаслідок того, що забезпечуваний функціоналом (13) максимум прибутку від реалізації ППВ необхідно далі розподілити між тими підприємствами, що взаємодіють у МТЛВ, відповідно до деякого правила, заснованого на компромісному дотриманні ділових інтересів усіх учасників здійснення вантажоперевалочного процесу.

Вказане правило може бути побудоване шляхом введення в модель оптимізації управління ППВ векторного критерію оптимальності, компоненти (складові) якого виступатимуть у якості локальних критеріїв, що відображують ділові інтереси підприємств МТЛВ.

Разом з цим більш конструктивним видається прямий шлях до рішення цієї задачі, який полягає в побудові відповідно до принципу оптимальності по Парето [19] непокрещуваного плану реалізації ППВ, тобто допустимого у формальному сенсі плану, який не може бути більше поліпшеним з точки зору критерію якого-небудь підприємства МТЛВ без того, щоб при цьому він (план) не був погіршений відносно критерію іншого або інших підприємств.

Такими ж цікавими представляються і інші підходи до постановки завдання управління взаємодією суміжних підприємств МТЛВ, зокрема, засновані на методологічному арсеналі теорій узгодження планових рішень [20], ігор [21], мереж Петрі [22], взаємодіючих процесів [23], імітаційного та евристичного моделювання [24, 25], логістики [26, 27], кластеризації [28, 29], маркетинга взаємодії та сітьових партнерських відносин [30].

Як показали наші дослідження, механізм адаптації кожного з перерахованих підходів до суті і особливостей досліджуваного в цій статті завдання потребує досить серйозного обґрунтування, що вимагає самостійного розгляду цієї проблеми.

**Висновки.** Узагальнення усього вищевикладеного дозволяє зробити наступні конкретні висновки.

По-перше, завдання управління взаємодією суміжних підприємств МТЛВ є дуже актуальними передусім в практичному відношенні. Про це переконливо свідчать приведені в цій статті факти про вкрай негативні наслідки неузгодженої роботи суміжних видів транспорту на етапах перевезення і перевалки вантажів, внаслідок чого підприємства транспорту, виробничої сфери і сервісного комплексу несуть сумарно багатомільярдні втрати у формі прямих збитків і упущеної вигоди. Звідси з очевидністю витікає висновок про необхідність забезпечення максимально можливої синхронізації в роботі транспортних підприємств усіх видів, у тому числі тих, що функціонують у МТЛВ, що є однією з обов'язкових умов скорочення згаданих вище транспортних, а, в кінцевому рахунку, народногосподарських втрат.

По-друге, обговорюване в цій статті завдання відрізняється великою актуальністю і в теоретичному відношенні, бо воно по суті своїй може бути віднесене до класу завдань управління безперервними розгалуженими виробничими процесами із змінною технологічною структурою, на що досі дослідники комплексних транспортних проблем не звертали уваги. Між тим, на нашу думку, саме з таких позицій слід підходити до аналізу цього завдання вже на стадії його постановки.

По-третє, ключова умова постановки обговорюваного завдання полягає в коректному виборі механізму узгодження управляючих рішень, що виробляються суміжними підприємствами МТЛВ при організації і здійсненні ППВ. Вище було показано, що спроба розв'язати цю проблему у рамках єдиної ("глобальної") моделі може привести до успіху лише у випадку, коли апіорі відомо, що усі суміжні підприємства МТЛВ однаково зацікавлені в інтегральному по вузлу результаті, що досягається при використанні єдиного (скалярного) критерію оптимальності. Проте у ситуації, коли домінантою стає ринковий прагматизм і егоїзм, такий підхід виявляється недостатнім, через що об'єктивно виникає необхідність в пошуку альтернативних концепцій постановки завдання, що логічно визначити в якості предмета наступного етапу його дослідження.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Магамадов А.Р., Савельева И.В. К проблеме толкования и количественного определения производственной мощности грузоперевалочных систем // Развитие методів управління та господарювання на транспорті: Зб. наук. праць. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2011. – № 36. – С.5-16.
2. Логистика: управление в грузовых транспортно-логистических системах / Под ред. Л.Б. Миротина. – М.: Юристъ, 2002. – 414 с.
3. Перевозка экспортно-импортных грузов. Организация логистических систем. – 2-е изд., доп. и перераб. / Под ред. А.В. Кириченко. – СПб.: Питер, 2004. – 506 с.
4. Клименко В.В. Логистические центры в транспортных узлах / В.В. Клименко, А.И. Федоренко // Логистика. – М.: Агентство Маркет Гайд, 2011. – № 8/11. – С. 26-30.
5. Зензинов Н.А. Выдающиеся инженеры и ученые железнодорожного транспорта / Н.А. Зензинов, С.А. Рыжак. – М.: Транспорт, 1920. – 480 с.
6. Образцов В.Н. К вопросу о комплексной теории транспорта // Известия АН СССР. Отделение технических наук. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – № 9-12. – С. 1035-1062.
7. Звонков В.В. Теоретические основы эксплуатации транспорта (во взаимодействии основных его видов). – В 10-ти ч. – М., 1949.
8. Терехов О.А. Совершенствование организации управления морскими портами / О.А. Терехов, В.Н. Тюрин. – М.: Транспорт, 1981. – 152 с.
9. Козлов П. Технология согласованного взаимодействия железных дорог и портов // Connect: Мир связи. – 2002. – № 11. – С. 12-13.
10. Меркунтович Ф.Д. Взаимодействие видов транспорта: Учебн. пособие / Ф.Д. Меркунтович, Ю.Г. Семик, Е.И. Кичкина. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2004. – 125 с.
11. Петров М.Б. Методология организации региональной транспортной системы. Автореф. дис... докт. техн. наук // М.Б. Петров; МГУПС. – М., 2004. – 47 с.
12. Сторожев В.В. О некоторых задачах проектирования транспортно-логистических систем с использованием геометрического программирования // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: Изд-во ОНМУ. – 2006. – Вып. 11. – С. 168-174.
13. Теория систем с переменной структурой / С.В. Емельянов и др. – М.: Наука, 1970. – 520 с.

14. Плискин Л.Г. *Оптимизация непрерывного производства*. – М.: Энергия, 1975. – 336 с.
15. Резер С.М. *Взаимодействие транспортных систем*. – М.: Наука, 1985. – 246 с.
16. Гольштейн А.Л. *Теория принятия решений. Задачи и методы исследования операций и принятия решений: Учебн. пособие*. – Пермь: ПГТУ, 2002. – 357 с.
17. *Принципы построения автоматизированных систем управления промышленными предприятиями с непрерывным характером производства* / Под. ред. Б.Н. Петрова. – М.: Энергия, 1975. – 440 с.
18. Багриновский К.А. *Математика плановых решений*. – М.: Наука, 1980. – 226 с.
19. Подиновский В.В. *Парето-оптимальные решения многокритериальных задач* / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука 1982. – 256 с.
20. Багриновский К.А. *Основы согласования плановых решений*. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
21. *Методы и модели согласования иерархических решений* / Под ред. А.А. Макарова. – Новосибирск, 1973. – 240 с.
22. Питерсон Дж. *Теория сетей Петри и моделирование систем* // Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
23. Хоар Н. *Взаимодействующие последовательные процессы* // Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 264 с.
24. Персианов В.А. *Моделирование транспортных систем* / В.А. Персианов, К.Ю. Скалов, Н.С. Усков. – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.
25. Кельтон В., Лоу А. *Имитационное моделирование. Классика CS*. – 3-е изд. – СПб.: Питер; К.: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
26. Кордюк Н.С. *Развитие логистической инфраструктуры в мультимодальных транспортных узлах: [Электронный ресурс]*. URL: [http:// cyberleninka.ru/article/n/razvitie-logisticheskoy-infrastruktury-v-multimodalnyh-transportnyh-uzlah](http://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-logisticheskoy-infrastruktury-v-multimodalnyh-transportnyh-uzlah) (Дата обращения 15.10.2013).
27. Пасевич Веслав. *Анализ процессов мультимодальных грузовых перевозок на базе логико-логистической матрицы и задачи формирования АСУ мультимодальными транспортными системами: [Электронный ресурс]*. URL: [http:// cyberleninka.ru/article/n/analiz-protsesov-multimodalnyh-gruzovyh-perevozk-na-baze-logiko-logisticheskoy-matrity-izadachi-formirovaniya-asu-multimodalnymi](http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-protsesov-multimodalnyh-gruzovyh-perevozk-na-baze-logiko-logisticheskoy-matrity-izadachi-formirovaniya-asu-multimodalnymi) (Дата обращения 15.10.2013).

28. Орлов С.В., Корнеевец В.С. Транспортный кластер как вариант развития транспортного комплекса: [Электронный ресурс]. URL: [http:// cyberleninka.ru/article/n/transportnuu-klaster-kak-variant-rasvitiya-transportnogo-kompleksa](http://cyberleninka.ru/article/n/transportnuu-klaster-kak-variant-rasvitiya-transportnogo-kompleksa) (Дата обращения 15.10.2013).
29. Ботнарюк М.В. Повышение конкурентоспособности транспортного узла на основе кластеризации: [Электронный ресурс]. URL: [http:// cyberleninka. ru/article/n/povyshenie konkurentosposobnosti-morskogo-transportnogo-uzla-na-osnove-klasterizatsii](http://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-konkurentosposobnosti-morskogo-transportnogo-uzla-na-osnove-klasterizatsii) (Дата обращения 15.10.2013).
30. Ботнарюк М.В. Методология формирования морского транспортного узла как института сетевых партнерских отношений: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gnozis.info/product54401.html>. (Дата обращения 15.10.2013).

*Стаття надійшла до редакції 21.10.2013*

**Рецензент** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Економічна теорія та кібернетика» Одеського національного морського університету **Г.С. Махуренко**

УДК 656.614.2:656.022.1

Д.О. Вишнеvский

**ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ  
И РАССТАНОВКА ФЛОТА В ЛИНЕЙНОМ СУДОХОДСТВЕ**

*В статье рассмотрена процедура формирования схем движения, для организации работы судов на линии по расписанию. Изложены вопросы, требующие предварительного решения для построения схем движения, осуществления рациональной расстановки судов и формирования самой линии. Изучены причины, по которым вопросы проектирования схем движения универсальных судов на сегодняшний день актуальны для участников транспортного процесса в современной конкурентной среде. Рассмотрены научные публикации, посвященные вопросам моделирования перевозочного процесса. Предложена экономико-математическая модель задачи формирования схем движения, при одновременном осуществлении оптимизации данных схем и расстановки универсальных судов на линии. Выделены принципиальные отличия данной методики от действующей практики в вопросах расстановки флота. Отмечены перспективы осуществления дальнейших исследований в сфере организации работы универсальных судов по расписанию, с применением полученных результатов.*

**Ключевые слова:** транспортный процесс, линейное судоходство, расписание, тоннаж, грузопотоки, схемы движения, расстановка флота, тоннажеспотоки, универсальные суда.

*У статті розглянута процедура формування схем руху, для організації роботи суден на лінії за розкладом. Викладені питання, що потребують попереднього вирішення для побудови схем руху, здійснення раціональної розстановки суден та формування самої лінії. Вивчено причини, за якими питання проектування схем руху універсальних суден на сьогоднішній день актуальні для учасників транспортного процесу в сучасному конкурентному середовищі. Розглянуто наукові публікації, присвячені питанням моделювання перевізного процесу. Запропоновано економіко-математичну модель задачі формування схем руху, при одночасному здійсненні оптимізації даних схем і розстановки універсальних суден на лінії. Виділено принципові відмінності даної методики від діючої практики в питаннях розстановки флоту. Відзначені перспективи здійснення подальших досліджень в сфері організації роботи універсальних суден за розкладом, із застосуванням отриманих результатів.*

**Ключові слова:** транспортний процес, лінійне судноплавство, розклад, тоннаж, вантажопотоки, схеми руху, розстановка флоту, тоннажеспотоки, універсальні судна.

*The article describes the procedure of formation of traffic patterns for the organization of future vessels' operation on the line within the schedule. Issues, requiring timely solving for the organization of traffic patterns, rational arrangement of the vessels and the formation of the line itself are studied in the article. Here were explored the reasons, which reveal the significance of the general cargo vessels' traffic schemes designing, for the participants of the transport process in today's competitive environment. A set of scientific publications devoted to the issues of the transport process modelling. Here is also proposed an economic-mathematical model of organization of traffic patterns, in order to perform simultaneous optimization of these schemes and disposition of the general cargo vessels on the line. Principal differences between this methodology and the current practice in the issues the fleet allocation were considered in the article. Here were also specified the perspectives of the further researches in the sphere of organization of the general cargo vessels' operation within the schedule, with the application of obtained results.*

**Keywords:** *transport process, liner shipping, schedule, tonnage, cargo traffics, traffic schemes, vessel's allocation, tonnage traffics, general cargo vessels.*

**Введение.** Важнейшим фактором, определяющим возможность лучшего использования морских транспортных судов, достижения наибольшей эффективности перевозок, является рациональная расстановка флота [1. С. 237].

Расстановка судов также представляет собой один из основных вопросов организации движения флота. Решать этот вопрос можно, лишь базируясь на определенных данных о грузопотоках.

Грузопотоки на предстоящий период времени устанавливаются исходя из экономического обоснования, а также тщательного анализа заявок грузоотправителей. При этом экономические изыскания ставят перед собой задачу выявления грузопотоков, установление их тяготения к тому или иному виду транспорта, а также разработку рациональных направлений грузопотоков.

**Актуальность.** Актуальность данной темы обусловлена заинтересованностью участников транспортного процесса в качественно новых способах расстановки судов на линии и составления схем движения, которые способствовали бы повышению эффективности работы универсальных судов по расписанию.

**Цель работы.** Разработка экономико-математической модели задачи формирования схем движения для последующей организации работы универсальных судов на линии, в рамках расписания.

**Основной материал.** При постановке задачи перспективного планирования основная тяжесть решения вопроса ложится на экономические изыскания. В то время как при оперативном планировании задача решается в основном на основе заявок клиентуры.

Схемы грузо- и тоннажепотоков отражают их совокупность за период действия линии. Грузовым линиям свойственны двусторонние сложные и, в отдельных случаях, простые схемы грузопотоков. Схемы тоннажепотоков являются преимущественно простыми, в связи с тем что суда на линиях обращаются между определенными конечными портами. Им корреспондируют совокупность круговых рейсов судов. Круговые рейсы являются основным видом перевозочного процесса на грузовых линиях. Он составляется из рейсов прямого и обратного направлений. Посещение портов захода предусматривается или в каждом рейсе, или поочередно при наличии факультативных портов.

Для построения эффективных схем работы судов необходимо должным образом осуществить расстановку флота. Качество работы судов на той или иной схеме будет выражаться в полученной прибыли.

Задаче рациональной расстановки флота уделено достаточно внимания в ряде научных работ [2-7]. В каждой из них предлагались методики, актуальные каждая для своего времени и для решения конкретных проблем. Так, к примеру, в работе [3] были раскрыты фундаментальные аспекты данного вопроса, в то время как в работе [2] уделено внимание расстановке крупнотоннажного флота.

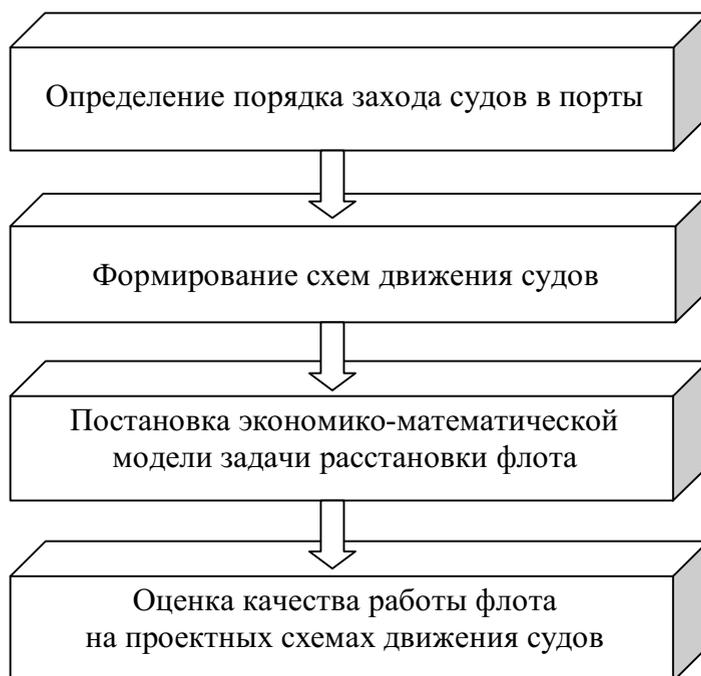
Следовательно, актуален поиск практичных способов расстановки судов и формирования схем движения для организации их дальнейшей работы на линии по расписанию, в современной, динамично изменяющейся конкурентной среде.

Для осуществления процедуры формирования схем движения, необходимо предварительно сформировать комплекс задач [8], решение которых в дальнейшем будет способствовать эффективной расстановке флота (см. рис.).

Таким образом, выполнив поставленные задачи и произведя оценку эффективности работы универсальных судов на проектных направлениях, в соответствии с системой формирования расписаний в линейном судоходстве [8], на следующей стадии можно будет принимать решение о целесообразности составления расписаний для построенных схем движения судов.

В ходе решения задачи формирования схем движения, суда осуществляют свою работу в рамках определенного эксплуатационного периода, поэтому как и в экономико-математической модели задачи отбора участков [9] его превышение недопустимо.

Каждая из проектируемых схем имеет свою собственную грузовую базу. Следовательно, суда, работающие на участках, не могут освоить больше груза, чем имеется в порту отправления. Также суда не способны перевезти за рейс больше груза, чем позволяют возможности их полной загрузки.



*Рис. Состав и взаимосвязь задач при реализации этапа формирования схем движения судов и расстановки флота*

Немаловажным требованием для решения этой задачи, является выполнение условия баланса грузопотоков, т.е. равенство числа начинающихся и заканчивающихся в каждом порту судорейсов для каждого типа судов.

Одновременную оптимизацию схем движения и расстановки флота возможно осуществить, применив подход к моделированию рассмотренный ниже. Предложенная экономико-математическая модель задачи формирования схем движения позволяет учесть род груза и не требует построения вариантов схем движения вне модели, а лишь задания определенных балластных переходов.

В качестве параметров управления при данных условиях принимаются показатели на участке, а не на схеме движения. Увязка участков работы флота (груженых и балластных) в замкнутые схемы движения обеспечивается вводимой в модель группой ограничений – уравнениями баланса судопотоков.

Задача формирования схем движения для организации работы судов на линии формулируется следующим образом. В рассматриваемом периоде, на ряде участков, определенных из экономико-математической модели задачи отбора участков [9], предъявляется к перевозке величина груза  $Q$  тыс. т. Для выполнения этих перевозок как и прежде использу-

ются суда, ( $i = 1, 2$ ) выбранные в ходе решения экономико-математической модели задачи отбора судов [10], для которых установлены затраты времени  $t_{\alpha\beta}^{ir}$  в сут, загрузки  $q_{\alpha\beta}^{ir}$  в тыс. т на каждом участке. Общее количество предъявленного груза все так же больше, нежели возможности флота по его перевозке, а бюджет времени в эксплуатации судов каждого типа составляет  $T_1, T_2$  судо-сут. как и для задачи [10].

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{r=0}^R \sum_{\alpha\beta \in G} c_{\alpha\beta}^{ir} \cdot x_{\alpha\beta}^{ir} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{\alpha\beta \in G} \sum_{r=0}^R t_{\alpha\beta}^{ir} \cdot x_{\alpha\beta}^{ir} = T^i, \quad (i = \overline{1, m}); \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m q_{\alpha\beta}^{ir} \cdot x_{\alpha\beta}^{ir} \leq Q_{\alpha\beta}^r, \quad (r = \overline{1, R}; \alpha, \beta \in G); \quad (3)$$

$$\sum_{j \in G_{\beta}^+} \sum_{r=0}^R x_{j\beta}^{ir} = \sum_{k \in G_{\beta}^-} \sum_{r=0}^R x_{\beta k}^{ir}, \quad (i = \overline{1, m}; \beta \in G); \quad (4)$$

$$x_{\alpha\beta}^{ir} \geq 0, \quad (i = \overline{1, m}; r = \overline{0, R}; \alpha, \beta \in G); \quad (5)$$

где  $x_{\alpha\beta}^{ir}$  – число рейсов, которое совершают суда  $i$ -го типа с грузом  $g$  на участке  $\alpha\beta$ ;

$t_{\alpha\beta}^{ir}$  – затраты времени судов  $i$ -го типа с грузом  $g$  на участке  $\alpha\beta$ ;

$q_{\alpha\beta}^{ir}$  – загрузка судов  $i$ -го типа с грузом  $g$  на участке  $\alpha\beta$ ;

$c_{\alpha\beta}^{ir}$  – прибыль судов  $i$ -го типа с грузом  $g$  на участке  $\alpha\beta$ ;

$T_i$  – эксплуатационный период работы судов  $i$ -го типа;

$Q_r^{\alpha\beta}$  – прогнозируемый объем грузопотока на участке  $\alpha\beta$ ;

$G$  – множество корреспондирующих портов;

$G_{\beta}^+$  – подмножество портов множества  $G$ , которые являются начальными для груженых и балластных участков, и заканчивающихся в порту  $\beta$ ;

$G_{\beta}^-$  – подмножество портов множества  $G$ , которые являются конечными для груженых и балластных участков, и начинающихся в порту  $\beta$ ;

$\alpha, \beta, j, k$  – совокупность корреспондирующих портов.

В приведенной экономико-математической модели задачи формирования схем движения, для организации работы универсальных судов на линии, выделены следующие ограничения (1)-(5):

(1) – целевая функция, обеспечивающая получение максимальной прибыли от перевозки грузов;

(2) – комплекс уравнений, отражающих условия, при которых суда могут эксплуатироваться ровно столько времени, сколько предусмотрено эксплуатационным периодом;

(3) – совокупность неравенств, при которых выполнение перевозок на направлениях осуществляется в объемах, не превышающих заданные;

(4) – группа уравнений, отражающих баланс судопотоков, при котором число судорейсов заканчивающихся в каждом порту, для судов каждого типа должно равняться числу начинающихся в нем судорейсов;

(5) – условие неотрицательности переменных.

Таким образом, в соответствии с результатами, полученными в ходе решения экономико-математической модели задачи формирования схем движения для организации работы тоннажа на линии, создаются замкнутые схемы движения. Следовательно, на следующем этапе можно приступить к составлению расписания работы флота. Соответственно, этим и будет обусловлен дальнейший ход исследований. В них будет использован опыт и применены результаты, полученные в ходе проведения работ [8-10]. Это позволит осуществить процедуру формирования расписаний работы универсальных судов в линейном судоходстве.

### **Выводы**

1. Сформулирован состав и взаимосвязь задач, требующих своевременного решения для осуществления расстановки флота и построения схем движения для последующей организации работы судов на линии.

2. Выявлено, что на сегодняшний день вопросы выполнения рациональной расстановки судов и формирования схем движения актуальны и представляют интерес для участников транспортного процесса в современной конкурентной среде.

3. Предложена экономико-математическая модель задачи формирования схем движения адекватных современным условиям, для последующей организации работы флота на линии.

4. Сформирована методологическая база, позволяющая приступить непосредственно к этапу формирования расписания работы универсальных судов в линейном судоходстве.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуревич Г.Е. Организация работы морского флота. – М., 1961. – 355 с.
2. Володин А.А. Модель расстановки крупнотоннажного флота и ее реализация: Сб. научн. трудов Союзморниипроекта. – М.: Транспорт, 1976. – Вып 39(45). – С 55-60.
3. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. – М.: Гл. ред. физ.-математ. лит-ры изд-ва "Наука", 1975.
4. Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Одностадийные системы. – М.: Наука, 1984.
5. Левин В.И. Структурно-логические методы в теории расписаний. Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2006.
6. Шибаяев А.Г. Экономико-математическое моделирование процессов перевозки грузов флотом морского пароходства Дис... д-ра техн. наук А.Г. Шибаяева. – Одесса: ОНМУ, 1996. – 300 с.
7. Johnson S.M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included, Naval Res. Log. Quart. 1954. P. 61-68.
8. Вишневский Д.О. Система формирования расписаний в линейном судоходстве // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ. – Вып 36. – С 35-47.
9. Вишневский Д.О. Обоснование состава участков для организации работы судов на линии // Сб. научн. трудов по материалам международной научно-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований `2013». – Одесса: ОНМУ, 2013. – Т. 1. – Вып 3. – С.54-58.
10. Вишневский Д.О. Обоснование состава флота для организации его работы на линии // Судовождение: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМА. – Вып 22. – С 58-65.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2013

#### Рецензенти:

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Організація митного контролю на транспорті» Одеського національного морського університету **С.П. Онищенко**

кандидат технічних наук, професор Одеської національної морської академії **І.М. Петров**

## АВТОРИ ЗБІРНИКА

**Вишневський Дмитро Олегович** – асистент кафедри «Морські перевезення» Одеського національного морського університету

**Войтенко Інга Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри основ і фундаментів Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Вичужанін Володимир Вікторович** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Інформаційні технології» Одеського національного морського університету

**Голіков Антон Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Судноводіння на морських та внутрішніх водних шляхах» Одеської національної морської академії

**Гришин Володимир Олександрович** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедрою «Теоретична і прикладна механіка» Одеського національного морського університету

**Гришин Андрій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Опір матеріалів», проректор з наукової роботи Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Демешкан Ірина Олександрівна** – аспірант кафедри «Судноводіння на морських та внутрішніх водних шляхах» Одеської національної морської академії

**Єгоров Геннадій В'ячеславович** – доктор технічних наук, професор, генеральний директор Морського інженерного бюро, м. Одеса

**Єгоров Олександр Геннадійович** – мол. наук. співпрацівник Морського інженерного бюро, м. Одеса

**Кириллова Олена Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Морські перевезення» Одеського національного морського університету

**Кобзарук Олександр Васильович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія матеріалів» Одеського національного морського університету

**Колеснікова Катерина Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційних технологій проектування в машинобудуванні Одеського національного політехнічного університету

**Конопльов Анатолій Васильович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теорія механізмів і машин і деталей машин» Одеського національного морського університету

**Ма Фен** – аспірант Одеського національного морського університету

**Мурад'ян Арсен Олегович** – асистент кафедри «Експлуатація морських портів» Одеського національного морського університету

**Нікітін Євген Васильович** – заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри судноводіння та морської безпеки Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова, професор кафедри судноводіння та безпеки судноплавства Севастопольського національного технічного університету

**Нільва Володимир Олександрович** – магістр, мол. наук. співпрацівник Морського інженерного бюро, м. Одеса, здобувач кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету

**Руденко Сергій Васильович** – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, директор Науково-дослідного інституту фундаментальних та прикладних досліджень Одеського національного морського університету

**Руденко Євген Сергійович** – ведучий інженер ЮФ ДП «АМПУ»

**Рудниченко Микола Дмитрович** – аспірант кафедри «Інформаційні технології» Одеського національного морського університету

**Сабуров Олександр Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, начальник морехідного училища ім. О. Маринеско

**Смажило Богдан Васильович** – в.о. доцента кафедри «Технологія матеріалів» Одеського національного морського університету

**Стрельцов Павло Маркович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини та механізація перевантажувальних робіт» Одеського національного морського університету

**Тарасенко Тетяна Владиславівна** – старший викладач кафедри «Судноводіння та енергетика суден» Ізмайльського філіалу ОНМА

*Наукове видання*

**ВІСНИК  
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**Збірник наукових праць**

**Випуск 3 (39)**

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 20.12.2013  
Формат 70x108/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 16,5.  
Замовлення № 652

Надруковано у Видавництві ОНМУ  
65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.  
Тел. 728 31 14