

ВІСНИК

ОДЕСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

24

Міністерство освіти і науки України



ВІСНИК

**ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

Збірник наукових праць

ВИПУСК 24

Заснований у 1998 році

Одеса – 2008

УДК 629.12.002(082)

ББК 39.42-011я43

В635

Вісник Одеського національного морського університету: Збірник наукових праць. – Випуск 24. – Одеса: ОНМУ, 2008. – 193 с. Українською, російською та англійською мовами.

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

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

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

Редакційна колегія:

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

Друкується за ухвалою Вченої ради
Одеського національного морського університету
від 28.05.2008 р. (протокол № 8)

© Одеський національний
морський університет, 2008

**ЛУБЕНОВ РОСТИСЛАВ ВИТАЛЬЕВИЧ -
ученый, педагог, инженер**



24 марта 2008 года исполнилось 100 лет со дня рождения известного ученого в области портового строительства, декана гидротехнического факультета, заведующего кафедрой «Водные пути и порты», кандидата технических наук, доцента Ростислава Витальевича Лубенова.

Многогранна и интересна жизнь этого талантливого, широко эрудированного и исключительно трудолюбивого инженера-гидротехника. В его творческой деятельности можно выделить три больших этапа: инженерная работа в качестве проектировщика, работа производственника и миссия педагога вуза.

Р.В. Лубенов родился в 1908 году в семье моряка. Трудовую деятельность начал в 1926 г. строительным рабочим. В 1928-1932 гг. учился в Одесском строительном институте, после окончания которого начал работать в Черноморпроекте, где быстро прошел путь от рядового инженера до начальника отдела проектирования портов, затем – главного инженера.

Ученые

Одесского национального морского университета

Р.В. Лубенов – участник Великой Отечественной войны, в годы войны он занимался инженерным обеспечением Черноморского флота. Награжден орденом Красной Звезды и четырьмя медалями.

В 1945 г. Р.В. Лубенов был направлен в полугодовую командировку в США, где ознакомился с оснащением, оборудованием и эксплуатацией портов. После войны Р.В. Лубенов был назначен главным инженером Одесского порта. В 1945-1950 гг. под его руководством в Одесском порту были восстановлены 11 причалов, рейдовый мол и волнолом, склады, водоснабжение, электрохозяйство, средства механизации порта и культурно-бытовые здания.

С 1951 года Р.В. Лубенов, обладая ценнейшим опытом проектной и производственной деятельности и будучи наделенным от природы большим организаторским талантом, перешел на преподавательскую работу в ОИИМФ. В 1954 г. он защитил кандидатскую диссертацию, затем был утвержден в ученном звании доцента. В течение 1954-1957 гг. он возглавляет гидротехнический факультет, а в 1957-1965 гг. – ведущую кафедру этого факультета – «Водные пути и порты». Список научных работ Р.В. Лубенова включает более 30 печатных трудов, в том числе 9 учебников и учебных пособий.

За 30-летнюю работу в ОИИМФе Ростислав Витальевич умело передавал свой производственный опыт и воспитал несколько поколений инженеров-гидротехников, педагогов и научных работников. Подготовил трех кандидатов технических наук (проф. П.И. Яковлев, доц. М.Н. Варгин, доц. В.В. Касьянов). Тысячи инженеров, работающих в разных портах, на разных морях благодарны ему за привитую любовь к морской гидротехнике. Значительная часть инженерного корпуса гидротехников в отрасли являются его учениками.

Его лекции отличались тщательной методической разработкой и являлись обобщением результатов научных исследований и инженерной практики, неизменно увлекали и заинтересовывали студентов. Ростислав Витальевич всегда уважительно относился к студентам, видел в каждом из них личность. И студенты его любили. Он пользовался у них непререкаемым авторитетом.

Его учебные пособия и методические разработки по устройству морских портов, конструкциям портовых сооружений разработаны удачно и доходчиво, их популярность у студентов не ослабевает.

Ростислава Витальевича отличали корректность, высокая порядочность, интеллигентность, доброжелательное отношение к людям. Он обладал большим личным обаянием и был человеком высокой культуры.

Ученики Р.В. Лубенова

СКЛОНЫ ОДЕССКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Продолжено описание склонов Одесского побережья и причин, порождающих на них оползневые процессы.

Ключевые слова: склоны, оползни, море, подземные воды, абразия, грунты.

На версту поверх монастыря на горе оказалась расселина великая, а монастырь стоял в полугоре и начала гора осыпаться со зрелым хлебом и бысть шум и треск велик от лесу и нападе на людей страх и ужасъ велика и пошла оная гора под монастырь землю и вышла в Волгу реку и оказалась буграми. ... И стали на Волге бугры великие: суды, которы стояли под монастырем на воде, и те суды стали на берегу на сухе сажен 20 от воды и больше, и, как поникла гора, пошли из горы ключи великие.

«Нижегородская летопись XVI в.»

Если кому-то приходилось отдыхать на благоустроенном пляже города героя Одессы, то, глядя на побережье, он будет примерно видеть картину, изображенную на рис. 1.



Рис. 1. Благоустроенные склоны

Это спокойно дремлющие уположенные склоны и построенные на них, но не дворцы для малышей или пенсионеров, а просто частные «хатенки», возведенные «господами» исключительно на «личные трудовые сбережения». Он видимо и не догадывается, что здесь совсем недавно, до обуздания склонов и моря, буйствовали, казалось совсем неудержимые, оползневые процессы. Если же ему не повезет, он окажется на диком пляже, которые пока еще существуют в Одессе, но некоторые уже обнесены колючей проволокой. Глядя недобрим взглядом на нависший над ним склон, например, изображенный на рис. 2, он, видимо, думает только о том, чтобы это все не обвалилось на его, не там пребывающую, голову. Вот так сейчас противоречиво выглядят Одесские склоны.

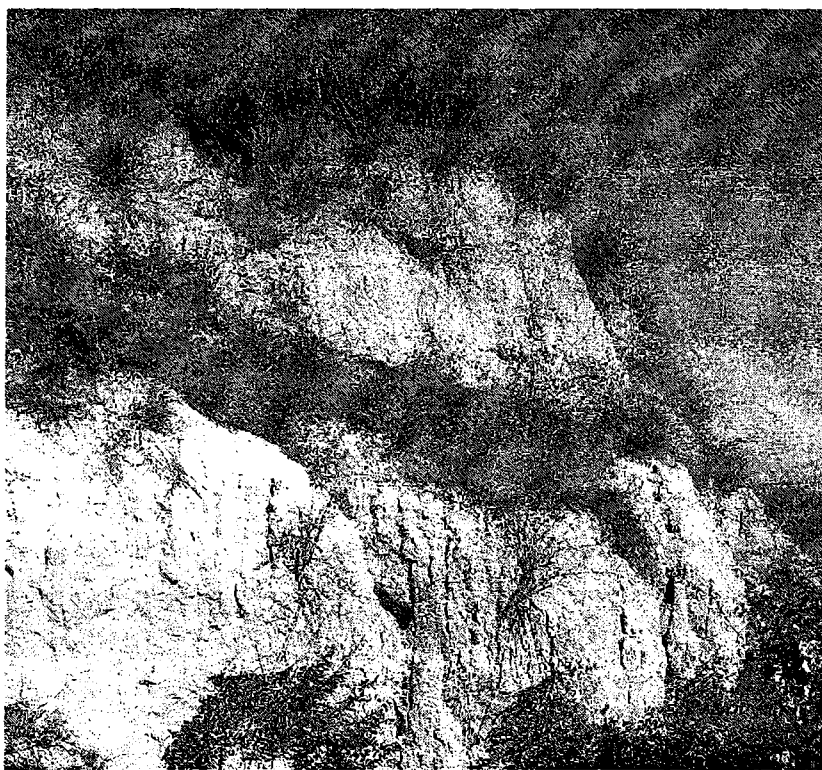


Рис. 2. Неблагоустроенные склоны

Уже более 200 лет нестабильность склонов морочит головы гражданам Одессы, забирая при помощи оползней лакомые кусочки земли, иногда вместе с возведенными на ней строениями. Часто затраченные на борьбу с ними «живые» деньги, обеспокоенных такой ситуацией одесситов, уходили и уходят просто через песочек или как «сквозь пальцы» во

все поглощающее безответное море. Были предложены более десяти моделей образования оползней, опубликовано более сотни научных работ, в которых описываются причины этих неприятных для одесситов явлений и предлагаются различные мероприятия по их стабилизации. Но успокоить склоны полностью пока не удастся, они регулярно напоминают о своем существовании, и по сей день, призрачно возникающими то в одном, то в другом месте побережья оползнями.

В статье [1] авторами начато описание склонов Одесского побережья и возникающих на них сложных и многофакторных оползневых процессов. Некоторые вопросы, связанные со склонами также приведены в монографии [2]. Что же побудило авторов после такого множества работ по Одесским склонам и оползням добавить по ним что-то новое?

Анализируя опубликованные работы, удалось установить, что применяемые методы расчета выполнены в основном несколько десятилетий назад в лучшем случае на полуэмпирическом уровне или на базе методов аналогий. Подобная количественная оценка состояния беспокойных склонов, которая должна являться основополагающим фактором возможного развития оползневых процессов, не может считаться удовлетворительно обоснованной. В основном выполнялись расчеты, базирующиеся на методах круглоцилиндрических поверхностей скольжения, которые позволяли весьма приближенно решать только вопросы устойчивости склонов посредством введения коэффициента запаса, но не определения реальных напряжений и деформаций в их грунтовой среде. Наблюдения за оползнями не подтверждают обрушения склонов по указанным поверхностям. Сам оползень и склон не являются твердыми недеформируемыми телами. Так, в процессе движения, как показывают фактические многочисленные наблюдения, оползень разрушается по большому числу не сразу образующихся трещин и обычно имеет несколько поверхностей (ступеней) скольжения. На геологических разрезах, составленных по данным буровых скважин, единой цилиндрической поверхности скольжения не было обнаружено и она обычно на них наносится приблизительно волевым образом. Поэтому, ее достоверность вызывает большие сомнения. Вот что писал по этому поводу крупнейший специалист по оползням Н.Н. Маслов [3]. «В течение своей многолетней деятельности в области инженерной геологии, имея дело с десятками оползневых проявлений, автор лишь один раз видел оползень, поверхность скольжения которого с некоторой натяжкой могла быть принята за круглоцилиндрическую». Сложный вид поверхности скольжения, основанный на натуральных наблюдениях, также отмечается в статье П.Н. Науменко [4]. В монографии [6] убедительно доказано, что эти методы решения применительно к оползневым склонам дают для целей практики совершенно неприемлемые результаты, а их различные уточнения незначительно сказываются на результатах расчета. В настоящее время разработаны как более совершенные упруговязкопластические модели грунтовых сред,

которые в большей степени согласуются с реальной природной обстановкой склонов и оползней, так и программные комплексы, позволяющие их реализовать на современных ЭВМ [2]. Поэтому, была сделана попытка выполнить исследования по уточнению исходных данных и моделей Одесских склонов, а также по методам расчета их устойчивости на современном научном уровне.

Решение любой проблемы базируется, как уже отмечалось, на системе входных данных. Для склонов ими являются свойства грунтовых сред, которые их образуют. Поэтому, прежде чем приступить к исследованиям устойчивости склонов, авторы решили кратко рассмотреть вопросы, касающиеся свойств грунтов и их существующих моделей, поэтому данная статья в основном посвящена этим вопросам. В последующих работах авторами планируется рассмотреть темы, связанные с причинами образования оползней и непосредственно с разрушением склонов.

Вначале необходимо установить из каких грунтовых пород состоят склоны Одесского побережья. Типичный, пока еще устойчивый склон, расположенный в районе Дофиновки, для примера показан на рис. 3.



Рис. 3. Склоны в районе Дофиновки

На этом рисунке вдали видна осевшая в результате ранее прошедшего оползня ступень склона. На плато недалеко от его бровки просматривается трещина (закол), предвестник будущего оползня, который может наделать много бед домикам, лежащим внизу на подножье склона. Да и строения, расположенные на плато, также не останутся в покое и могут быть разрушены.

Протяженность склонов на Одесском побережье составляет около 120 км, а их ширина в среднем равна 0,5-1,0 км. Береговая линия имеет извилистое очертание и представляет собой систему бухт размером от 20 до 300 м в длину и от 5 до 50 м в ширину, обусловленных различными прочностными свойствами грунтов и оползневыми процессами. Осуществленные на некоторых участках побережья противооползневые мероприятия, включающие уположение склонов, намыв пляжей и устройства берегозащитных сооружений, существенно изменили его очертание.

Изучением грунтов, образующих Одесские склоны, занимались В.В. Жихович, П.Н. Науменко, сотрудники ДИИТ под руководством профессора М.Н. Гольдштейна и другие ученые. Наиболее существенные их исследования опубликованы в работах [10; 12; 14; 16]. По данным различных исследователей глинистые породы составляют 65-80 % всех осадочных пород. Наличие глинистых пород или их чередование с другими породами (песчаными или скальными) определяет возможность образования оползней на склонах. Они представляют собой сложные природные образования, которые характеризуются пластичностью и связностью, а также большой изменчивостью деформационных и прочностных свойств.

Наблюдениями установлено [4], что верхняя грань склонов Одесского побережья в основном является почти горизонтальной поверхностью, возвышающейся над морем на 32-45 м. Ниже почвенного слоя лежит слой лесса толщиной до 30 м, который способен сохранять почти вертикальный откос, как показано на рис. 3. Глубже его расположено четвертичное образование красно-бурых глин мощностью до 6 м. На глинах, как на водоупоре, в лессе находится верхний водоносный безнапорный горизонт, при коэффициенте фильтрации равном $0,23-2,71 \text{ м}^3/\text{сут}$. Его питание происходит за счет атмосферных осадков, вод орошения и в результате утечки из коммунальных водопроводных и канализационных сетей. Дренами являются берега моря, балки и овраги. За последнее время ухудшились условия стока вод. Это вызвано тем, что склоны балок распахиваются, некоторые из них засыпаются, а в городской части застраиваются. Увеличивается сброс канализационных и водопроводных вод в грунтовые массивы из-за аварийных ситуаций и изношенности труб. Все это приводит к повышению уровня грунтовых вод в Одессе.

Далее под глинами лежат трещиноватые понтические известняки толщиной 10-15 м. Ширина трещин колеблется от волосяных до 0,5 м. От подошвы известняка и выше расположен довольно обильный, но также безнапорный второй водоносный понтический горизонт мощностью от 0,3 до 6 м. Он дренируется всеми крупными балками и приморскими склонами, а также возведенными искусственными дренажами в виде штолен и галерей. Коэффициент фильтрации известняка достигает более $60 \text{ м}^3/\text{сут}$. На 1 км побережья водоносный горизонт поставляет до $3600-5000 \text{ м}^3/\text{сут}$

воды. Он играет важную роль в образовании оползней. Уровни и направление стока вод этого горизонта зависят от уровней и уклона поверхности водоупора, создаваемого мэотическими глинами. Впервые гидрогеологическая карта изолиний поверхности мэотических глин города Одессы была составлена проф. А.К. Алексеевым в 1926 г. Например, большой холм мэотических глин расположен на углу улиц Канатная и Успенская, откуда скат направляется во все стороны, в том числе и к морю. В районе порта наблюдается также скат по направлению к Ланжерону. Большая котловина этих глин отмечена в районе Куликова поля с понижением в направлении Отрады.

Известняки покоятся на мэотических глинах мощностью от 15 до 70 м, с которыми собственно и связаны наиболее крупные оползневые деформации склонов. В толще глин залегают обводненные линзы и прослой песка. Кроме того, воды понтического горизонта, проникая в мэотические глины, изменяют их свойства. Более нижние слои грунта не принимают участие в оползневых процессах, и они здесь не рассматриваются.

В настоящее время реология грунтов развивается в основном по двум направлениям:

- на макрореологическом (феноменологическом) уровне исследуются упруговязкопластические свойства грунтов, рассматриваемые как деформируемые или абсолютно жесткие среды, и используются расчетные механические модели, предложенные различными авторами и приближенно полученные из непосредственного наблюдения над грунтами.

- на микрореологическом уровне для изучения структурных изменений и свойств грунтов используются физический и физико-химический подходы.

Механические модели феноменологической реологии также в основном базируются на гипотезе о сплошности деформируемых сред. Однако, теории и методы исследования, принятые в механике сплошных тел, не могут быть полностью распространены на грунты, обладающие специфическими свойствами. Это вызвано тем, что они являются трехфазной и пористой системой. К первой фазе относится совокупность минеральных частиц и связывающая их среда, имеющая как водноколлоидную, так и цементационную природу. Их объединения образуют скелет грунта. Ко второй фазе относится свободная жидкость, а к третьей — газ, находящейся в нерастворенном и растворенном в жидкости состоянии. Последние две фазы заполняют поры скелета грунта. Каждая из фаз под действием внешних сил деформируются по своим законам, и их количественное содержание в единице объема изменяется. Предполагается, что элементарные объемы грунта должны содержать достаточное количество его фазовых составляющих, обладающих всеми присущими им свойствами. Механические модели отображают не реальные физические и физико-химические процессы, протекающие в грунтах, а их

внешнее проявление в виде различных комбинаций упругих, вязких и пластических элементов, которое описывается уравнениями теории упругости, ползучести и пластичности, широко используемые для решения инженерных задач.

Следуя Н.Я. Денисову [7], под понятием частицы глинистых грунтов подразумеваются коллоидные (менее 0,0001 мм), глинистые (менее 0,002 мм), а также пылеватые и песчаные частицы, окруженные коллоидными пленками-гелями. При этом связи между частицами рассматриваются как сцепление. Эти частицы могут быть соединены в агрегаты, причем сцепление внутри агрегатов является большим, чем между агрегатами. Частицы и их агрегаты находятся в сложном взаимодействии и называются структурными элементами. Контакты непосредственно между частицами обычно отсутствуют, а осуществляются через прослойки жидкости. Поэтому прочность глинистых грунтов определяется прочностью их структурных связей, которые в течение всего геологического периода их образования и существования изменяются под действием естественных факторов. Состав, сложение и контактное взаимодействие структурных элементов характеризует структуру грунта. Одной из структурных характеристик грунта является его пористость. У глинистых грунтов размеры пор и частиц чрезвычайно малы, поэтому они оказывают большое сопротивление движению сквозь них воды.

Прочность глинистых грунтов при различных воздействиях определяется не прочностью самих частиц, а прочностью связей между ними, т. е. сцеплением. Оно является одной из основных причин проявления в грунтах таких свойств как упругость, пластичность и ползучесть. Сцепление является количественной характеристикой связанных грунтов, представителем которых являются глины, и зависит от их плотности и влажности. Связи между частицами грунта в значительно меньшей степени сопротивляются отрыву, чем сжатию. Это связано с уменьшением толщины водных пленок при сжатии и их увеличением при растяжении.

Поэтому образование трещин в грунтах при их разрушении наблюдается не по частицам, а по связям между ними.

Жидкость в грунте обычно насыщена солями и представляет собой раствор, от которого зависит прочность межчастичных связей. Этот раствор может взаимодействовать со структурными минеральными элементами глинистых грунтов и оказывать влияние на их свойства. Так, при концентрации солей около 6 % модуль объемного сжатия увеличивается более чем на 25 %. Жидкость может находиться в парообразном, связанном и свободном виде, каждая из которых обладает своими свойствами. Так, связанная вода характеризуется повышенной плотностью (1,2-3,4 г/см³), обладает свойством упругости и сопротивляется сдвигу.

Газы в грунтах находятся в свободном и растворенном в жидкости виде. Последние существенно влияют на структуру и свойства водных

растворов и сказывается на их сжимаемости и изменении начального порового давления. Так, содержание газа всего 0,045 % увеличивает сжимаемость жидкости в 10 раз.

Микрореологический подход к изучению грунтов позволяет, во-первых, произвести количественную и качественную оценку их упрощенных макрореологических моделей и, во-вторых, разрабатывать новые микрореологические модели, учитывающие временную взаимосвязь структурообразования грунтов с их напряженно-деформируемым состоянием в условиях сложного напряженного воздействия. Микрореология грунтов рассматривает действие внешних сил на объемы грунта, соизмеримые с объемом элементарных частиц, и изучает их перемещение из одного равновесного состояния в другое с учетом структурных связей, свойств связанной и свободной жидкости, граничного трения и анизотропии. При этом считается, что ввиду сложности и своеобразия таких проблем, их решить можно путем сочетания двух подходов: коллоидно-химического и физического, которые в исследованиях грунтов дополняют друг друга [5]. Это сложное направление исследования является мало изученным, следовательно, построение реологических моделей на микрореологическом уровне пока практически не представляется возможным. Поэтому в настоящее время используются и разрабатываются, опираясь на экспериментальные данные, в основном феноменологические модели.

Однако в последнее время благодаря работам Н.Н. Маслова, Н.Я. Денисова, М. Хворослева и Л. Бьеррума [6; 7] получило интенсивное развитие физико-техническое направление, которое использует некоторые результаты микрореологического направления для построения механических моделей феноменологического уровня. Оно заключается в следующем. Ввиду сложности природы полного начального сцепления грунтов, которое возрастает при повышении плотности и понижении влажности, были предприняты попытки его разделения на несколько видов. Впервые Н.Н. Масловым в 30-х годах прошлого столетия была разработана для грунтов теория «плотности-влажности» [6], в которой наиболее обосновано полное сцепление было разделено на две части и дано физическое толкование каждой из этих частей. Первая часть, характеризующая вязкие свойства водно-коллоидной природы, зависящая от влажности и нагрузки, имеет обратимый характер и названа связностью. Она особенно ярко проявляется в пластичных глинистых грунтах, которые полностью лишены другой составляющей сцепления. Вторая часть общего сцепления, не зависящая от нагрузки, имеет явно выраженный жесткий и хрупкий характер. Она всегда необратима, не зависит от плотности-влажности грунта и названа структурным сцеплением. В зависимости от природы грунтов в них могут наиболее полно проявляться либо связность, либо структурное сцепление, или обе части сцепления одновременно. Экспериментальное определение обоих составляющих полного

сцепления изложено также в монографии [6]. Разделением сцепления на две части с их более глубокой физической трактовкой и с другими наименованиями этих частей занимались Н.Я. Денисов и П.А. Ребиндер.

Н.Н. Масловым в теории «плотности-влажности» была предложена реологическая модель прочности и деформирования грунта и определены ее уравнения. Деформационные соотношения базируются на теории течения Бингама-Шведова, как зависимости между скоростью вязкого течения и касательным напряжением. В общем виде они включают порог ползучести и динамическую вязкость, методика определения которых изложена в монографии [6]. Если в грунте возникают касательные напряжения, которые меньше по величине порога ползучести, то согласно этой теории, деформации грунта можно считать псевдоупругими, в противном случае они будут упруговязкопластическими. Следует отметить, что в этой теории прочностные вопросы освещены удовлетворительно и подтверждены экспериментальными данными, но вопросы, касающиеся упруговязкопластического деформирования, представлены только в первой приближенной постановке.

Наиболее противоречивые мнения специалистов относятся к вопросу, связанному с начальной и длительной прочностью глинистых пород, которые связаны с определенными состояниями их структуры. Некоторые исследователи считают, что прочность глин со временем падает (С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, Н.Н. Маслов, Р. Хефли). Другие наоборот полагают, что в этом случае снижение прочности не происходит (С.Р. Месчан, В.В. Жихович, Р.Э. Дашко). Третьи принимают, что при некоторых условиях возможно как снижение прочности, так и его отсутствие (Н.А. Цытович, З.Г. Тер-Мартirosян). Причина видимо зависит от того, во-первых, с чем и как сравнивать длительную прочность и, во-вторых, в процессе ползучести глинистые грунты одновременно и упрочняются и разупрочняются, но не установлены критерии, при каких количественных соотношениях это происходит.

Экспериментальные и натурные наблюдения показали, что причиной ослабления глинистых грунтов во времени является потеря ими некоторой части присущего им сцепления. Некоторые ученые (А. Скемптон, П.В. Роу и другие) утверждают, что глины способны полностью терять свое полное сцепление во времени. Н.Н. Маслов и некоторые зарубежные ученые возражают против этой концепции. Они считают, что прочность глинистых пород может снижаться во времени при разрушении присущих им необратимых связей структурного сцепления. Это происходит при превышении деформации глин некоторого предельного значения или при нарушении их структуры.

М.Н. Гольдштейн, С.С. Вялов, Г. Хефели [8; 9] и ряд других ученых считают, что разрушение грунта наступает после того, как возникающая деформация ползучести достигает некоторого постоянного предела, превышение которого ведет к его разрушению. Они полагают, что

эта предельная величина деформации является константой данного грунта, которая не зависит от величины напряжений и времени до разрушения. Однако, на основании экспериментальных данных, полученных С.Н. Сотниковым, В.В. Жихович, М. Саито и Х. Уезава, это утверждение опровергается. Ими отмечается, что разрушение глинистых грунтов начинается тогда, когда средняя скорость их деформации превосходит некоторую критическую скорость деформации.

Экспериментальные данные показывают, что пока у глинистых грунтов сохраняется структурное сцепление, они деформируются под действием нагрузки как упругие твердые тела. В этом случае проявляются только условно-мгновенные обратимые деформации. Если нагрузка или процессы выветривания преодолевают влияние структурного сцепления, то продолжают возрастать обратимые деформации и возникают пока локальные необратимые деформации, связанные со смещениями структурных элементов. Такие деформации названы структурными. С увеличением нагрузки сверх порога ползучести происходит более интенсивное нарушение структурных связей и самой структуры. В этом случае структурные элементы, преодолевая связи, начинают движение в сторону пор, происходит их переориентировка и возрастает процесс уплотнения. В начальный момент этот процесс идет достаточно быстро, но затем он замедляется вследствие восстановления некоторых структурных связей, что подтверждается опытами Б.Ф. Рельтова. Подвижность структурных элементов вначале вызывает разрыхление грунтов, а затем сопровождается их упрочнением. В результате таких взаимных перемещений увеличивается количество частиц в единичном объеме, в котором прочность связей между частицами наименьшая. Нарушение структурных связей происходит постепенно сложным образом, так как напряженное состояние в связях между частицами является неодинаковым. Разрушение вначале наблюдается там, где пленка веществ, создающих структурное сцепление, имеет минимальную прочность, а касательные напряжения, наоборот, наибольшую величину. В результате с увеличением нагрузки образуются микротрещины, и происходит дробление агрегатов на отдельные структурные элементы, способных по размерам проникать в поры глин.

Экспериментально установлено, что начало подвижки оползня сопровождается изменением физического состояния грунта в зоне смещения: перестройкой структуры, падением порового давления и миграцией влаги из окружающего грунта в эту зону. Многими учеными также отмечено снижение прочности грунтов в зоне оползневого смещения [12]. Поэтому расчеты устойчивости оползневых склонов, выполненные по исходным данным, полученным по обычным лабораторным испытаниям, дают завышенные результаты. Определенные в лаборатории прочностные характеристики грунтов не соответствуют действительной прочности грунтов по поверхности смещения. Например, К. Терцаги, анализируя ряд оползней [15], установил, что сопротивление сдвигу плотных трещино-

ватых глин в зоне смещения оползня уменьшилось со значения 0,11-0,22 МПа до 0,03 МПа и меньше. К таким же результатам пришел Л. Бьеррум [15] и А.Я. Туровская [16].

Степенью водонасыщения грунта или степенью его влажности S_r , называется отношение его объема воды к объему пор. Этот показатель характеризует фазовое состояние грунта. При не полностью водонасыщенном грунте, когда $S_r < 0,8$, поровая вода не оказывает существенного влияния на его объемные изменения. Поэтому реологический процесс будет определяться только ползучестью грунта и его можно условно считать однофазной средой. При $S_r > 0,8$ реологический процесс будет определяться как ползучестью скелета грунта, так и его сжимаемостью и вязким сопротивлением отжатию поровой воды. В этом случае грунт нельзя рассматривать в виде однофазной среды. Но измерение давления в поровой воде начали производить сравнительно недавно, и его влияние на прочность грунтов в оползневых склонах пока мало изучено. Поэтому считается [6; 10], что наличие избыточного давления в поровой воде свидетельствует о незавершенности уплотнения грунта, т. е. оно является показателем степени завершенности его уплотнения, и должно учитываться через такие прочностные параметры как угол внутреннего трения и сцепление при их существующей во времени природной плотности и влажности.

Часто для определения прочности водонасыщенных грунтов используется процесс фильтрационной консолидации. Согласно этой теории общие или тотальные напряжения в многофазном грунте представляются в виде суммы. Ее слагаемые состоят из напряжений, определяющих деформированное состояние скелета грунта, которые называются эффективными напряжениями и порового давления, действующего в поровой жидкости. Приложенная к водонасыщенному грунту нагрузка в первый момент времени полностью воспринимается поровой жидкостью. Затем по мере уплотнения грунта поровое давление снижается до нуля и эта нагрузка полностью воспринимается скелетом грунта. Следует отметить, что в большинстве практических случаях теория фильтрационной консолидации не соответствует реальным условиям работы грунта под нагрузкой. Так, Н.Я. Денисовым показано [7], что основное предположение этой теории консолидации о равенстве нулю напряжений в скелете грунта в первый момент после приложения нагрузки не соответствует действительности, так как это возможно только при равенстве нулю модуля упругости частиц скелета, что нереально. Сопротивление объемному сжатию газированной поровой жидкости должно было бы сопоставляться такому же сжатию частиц скелета, которое в некоторых случаях может быть больше, чем для жидкости, и, следовательно, вначале скелет, а не жидкость должен воспринимать действующую нагрузку. Но, как было

отмечено выше, объемное сжатие скелета грунта происходит вследствие перемещения его частиц, а не от их сжатия. Поэтому делается сопоставление несравнимых явлений, что является недопустимым.

В зависимости от коэффициента фильтрации k , который является функцией пористости, глинистые породы подразделяются на водопроницаемые при $k > 10^{-5}$ см/с, слабопроницаемые при $10^{-5} > k > 10^{-9}$ см/с и практически водонепроницаемые при $k < 10^{-9}$ см/с.

Степень влияния в реологическом процессе свойств ползучести скелета грунтов и их фильтрационных свойств зависит от коэффициента фильтрации k , ползучести грунта и длины пути фильтрации. Для оценки того или иного фактора на реологический процесс Э.Г. Тер-Мартirosяном введен безразмерный параметр μ_c [11], характеризующий интегральную вязкость грунта, включая вязкость скелета и вязкость поровой жидкости, которая возникает при отжатии ее из пор грунта. Он считает, что для грунтов, обладающих показателями $k \geq 10^{-5}$ см/с и при $\mu_c = < 0,001$, скорость протекания объемных деформаций будет обусловлена в основном ползучестью скелета. В таких случаях нет необходимости рассматривать задачу консолидации при прогнозе временных процессов, достаточно ограничиться учетом ползучести скелета грунта. Для грунтов, обладающих коэффициентом фильтрации $k = < 10^{-8}$ см/с и при значениях $\mu_c > = 10$, обусловленных большими размерами массива или большой вязкостью скелета, временной процесс в грунте будет определяться главным образом вязким сопротивлением поровой жидкости при сжатии. Следовательно, учет ползучести скелета при прогнозировании напряженно-деформированного состояния во времени не обязателен. Но при расчете склонов по второму предельному состоянию возникает необходимость определения деформаций ползучести в процессе консолидации грунта.

Далее несколько подробнее рассмотрим мезотические глины, как наиболее опасные в оползневом процессе. Грунты Одесских склонов изучены еще слабо. В свое время Д.Ф. Жаринцев полагал, что эти глины весьма твердые и не находятся в пластическом состоянии И.Ф. Синцов, наоборот считал, что глины разжижены и текуче-пластичны. Опытные данные показали чрезвычайную неоднородность этих глин, причем в них содержатся многочисленные, расположенные без какой либо закономерности, гнезда, линзы и прослойки песка, заполненные жидкостью, мощность которых изменяется от нескольких миллиметров до нескольких метров. Микроскопическое изучение глин показало наличие многочисленных микротрещин, особенно в зоне оползневого смещения. В них также очень часто встречаются как в массиве грунта, так и на оползневом склоне макроскопические зеркально-блестящие поверхности со штрихами движения. Можно выделить три типа таких глин:

- с массивной текстурой и раковистым или ровным изломом;
- с комковатой, переходящей в брекчиевидную, текстурой;
- с тонкими невыдержанными песчаными прослоями.

При этом нет резкого перехода от одной разновидности глин к другой. Следовательно, в лабораторных условиях можно определить только свойства отдельных типов мэотических глин, но не свойства, характеризующие в целом устойчивость склона. Средние значения гранулометрического состава и физических свойств мэотических глин, залегающих на оползневом склоне и на плато, почти не отличаются друг от друга [13]. Некоторые из них в естественных условиях залегания равны [4; 12]: естественная влажность 28,6%; коэффициент пористости 0,8; объемный вес грунта $1,95 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; объемный вес скелета $1,66 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; степень влажности 0,95%; гранулометрический состав: песчаные 2-0,05 мм – 10%, пылеватые 0,05-0,005 мм – 58%, глинистые <0,005 мм – 32%; сопротивление сдвигу при $P = 10, 20, 30 \text{ Н}$ $\Phi = 23^\circ$, $c = 0,122 \text{ Мпа}$; пиковая прочность 0,44 Мпа; установившаяся прочность 0,06 Мпа.

О некоторых свойствах понтических известняков было сказано выше. Рассмотрим их дополнительные средние характеристики в естественных условиях залегания [4]. Естественная влажность 5,7%; коэффициент пористости 1,15; объемный вес в сухом состоянии $1,24 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; удельный вес $2,71 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; полная влагоемкость 0,44; водопоглощение 23,6%; предел прочности: в сухом состоянии $150 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$, при естественной влажности $87 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$, в водонасыщенном состоянии $100 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$.

Из дополнительных средних свойств красно-бурых глин в естественных условиях залегания рассмотрим следующие [4]. Естественная влажность 24,5%; коэффициент пористости 0,71; объемный вес грунта $1,85 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; объемный вес скелета $1,6 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; степень влажности 0,93; гранулометрический состав: песчаные 2-0,05 мм 13%, пылеватые 0,05-0,005 мм 48%, глинистые <0,005 мм 39%; сопротивление сдвигу при $P = 10, 20, 30 \text{ Н}$ $\Phi = 20^\circ$, $c = 0,152 \text{ Мпа}$.

Дополнительные средние свойства лесса в естественных условиях залегания равны [4]: естественная влажность 16,7%; коэффициент пористости 0,71; объемный вес грунта $1,85 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; объемный вес скелета $1,57 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$; степень влажности 0,7; гранулометрический состав: песчаные 2-0,05 мм 12%, пылеватые 0,05-0,005 мм 62%, глинистые <0,005 мм 26%; сопротивление сдвигу при $P = 10, 20, 30 \text{ Н}$ $\Phi = 19^\circ$, $c = 0,3 \text{ Мпа}$.

Большая часть оползших пород не перемещивается, так как в движение приходят огромные массы земли, сохраняющие между собой

связанность. Опыты на срез оползших пород не показали уменьшения сил трения и сцепления. На оползших террасах встречается вода, но отсутствует выдержанный водоносный горизонт. Так, в некоторых пробуренных скважинах вода вообще не встречается или ее можно встретить в нескольких водоносных и водоупорных пропластках.

В связи с уположением склонов, их застройки, изменением водного режима и строительством берегоукрепительных сооружений меняется напряженное состояние и свойства их грунтов. Определение напряженно-деформированного состояния склонов и их устойчивости в основном зависит не только от правильно принятой расчетной модели, но и от наиболее точного определения физико-механических свойств грунтов в естественных и оползневых условиях залегания. Этому важному фактору, необходимому для качественного и количественного анализа состояния склонов, должно уделяться серьезное первостепенное внимание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин В. А., Гришин А. В. *Одесские склоны и оползни // Вісник ОНМУ. – 2007. – Вип. 22. – С. 3-19.*
2. Гришин В. А., Дорофеев В. С. *Некоторые нелинейные модели грунтовой среды. – Одесса: Внешрекламсервис, 2007. – 310 с.*
3. Маслов Н. Н. *Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 467 с.*
4. *Оползни Черноморского побережья Украины. – М.: Недра, 1977. – 103 с.*
5. Кульчицкий Л. И., Усъяров О. Г. *Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1981. – 178 с.*
6. Маслов Н. Н. *Механика грунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.*
7. Денисов Н. Я. *Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 288 с.*
8. Гольдштейн М. Н. *Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.*
9. Вялов С. С. *Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.*

10. Емельянова Е. П. Основные закономерности оползневых процессов. – М.: Недра, 1972. – 310 с.
11. Тер-Мартirosян З. Г. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений. – М.: Стройиздат. 1990. – 200 с.
12. Гольдштейн М. Н., Туровская А. Я., Тимофеева Т.А. и др. Исследования глубоких оползней Одессы // Вопросы геотехники, № 12. – К.: Будівельник. – 1968. – С. 7-36.
13. Лужецкий А. Н. Изменение физико-технических свойств мезотических глин при оползневых явлениях // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 38. – Энергия, 1968. – С. 168-173.
14. Жихович В. В. О ползучести, стандартной и длительной прочности плотных мезотических глин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1963. – № 4. – С. 7-10.
15. Проблемы инженерной геологии. Вып. 1. – Издательство иностранной литературы, 1958. – 261 с.
16. Туровская А. Я., Пергаменщиков А. С. // Вопросы геотехники. № 7. – М.: Транспорт. – 1964. – С. 69-82.

Надійшла 20.02.08

УДК 519.872:624.137.4

В.А. Гришин
А.В. Гришин

АНАЛИЗ ОПОЛЗНЕЙ НА СКЛОНАХ ОДЕССКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Продолжено описание склонов Одесского побережья и причин, порождающих на них оползневые процессы.

Ключевые слова: склоны, оползни, море, подземные воды, абразия, грунты.

*И божьим изволением грех ради наших
оползла гора сверху над слободой, и засыпало
в свободе сто пятьдесят дворов с людьми, и
со всякой скотиной.*

«Нижегородская летопись XV в.»

Чтобы наиболее достоверно установить напряженно-деформированное состояние склонов, необходима современная их расчетная модель, более полно отражающая реальные основные свойства грунтов, залегающих в массиве склона. Она также должна базироваться на последних достижениях механики грунтов и вычислительной техники и учитывать результаты анализа достоинств и недостатков существующих методик и решений, устанавливающих состояние склонов и образование на них оползней. Данная статья является продолжением ранее опубликованных авторами работ по одесским склонам [1; 2]. В ней сделана попытка кратко проанализировать состояние исследований только по устойчивости склонов. Методам расчета склонов будет посвящена следующая работа.

Одесскими склонами и оползнями занимались такие крупные ученые как Гаюи (1813-1831 гг.), А.Н. Августович (1861 г.), Ф. Ройтман (1883-1886 гг.), А.Ф. Жаринцев (1886 г.), И.Ф. Синцов (1894-1898 гг.), И.В. Мушкетов (1899г., 1924г.), С.Г. Нудельман (1903-1908 гг.), П.В. Погребов (1924 г.), А.К. Алексеев (1925-1928 гг.), Е.Е. Китран (1928 г.), А.М. Дранников (1939-1958 гг.), И.Я. Яцко (1932-1958 гг.), Е.П. Емельянова и многие другие. В 1932 г. была открыта Одесская оползневая станция.

Напомним, что собой представляют Одесские склоны. На довольно мощном слое мэотических глин, кровля которых находится несколько выше уровня моря, находится пласт понтического известняка.

Выше лежат красно-бурые глины и толща лессов, способных сохранять почти вертикальный откос. Над красно-бурыми и над мэотическими глинами расположены два водоносных горизонта. Следует отметить, что за время существования Одессы оползневые явления наблюдались в среднем не реже одного раза в год.

Какие же процессы возникают на побережье между склоном и морем, т. е. в районе подножья склона? Вот так описывают И.Ф. Синцов и О.Г. Нудельман оползень, который наблюдался в 4 часа дня 5 ноября 1897 г. на Малом Фонтане. «Полоса земли, отделившая от плато по трещине, образовавшейся еще весной, опустилась на 12,6-19 м и наклонилась в сторону плато. Длина опустившегося участка составляла 285 м, а наибольшая ширина 21 м. Вся полоса земли до моря была сильно деформирована и сдвинута в сторону моря. Морское дно было также выжато, вследствие чего образовался большой вал длиной 640 м, вытянутой параллельно берегу. Движение земли, начавшееся в 4 часа дня, продолжалось всю ночь и лишь на другой день постепенно стихло. Движение было столь спокойным, что сейсмографы обсерватории, расположенные по соседству, его не отметили».

Рассмотрим два характерных примера, связанные с оползнями на Одесском побережье.

Первые публикации по склонам и оползнях Одессы появились в 1813 году, но первая обоснованная модель образования оползней была предложена геологом Гауи только в 1830 году. Как отмечено в статьях [1; 3], он определяет происхождение оползней действием грунтовых вод, текущих по слоям известняка и мэотических глин. По его мнению, грунтовая вода по мере своего просачивания вымывает частицы глины. Вследствие этого образуются пустоты, которые со временем увеличиваются. Затем зависшая над пустотами масса известняка и лежащего на нем лесса отрываются от материковой части грунта и оседают на размягченную действием воды глину. Вследствие удара осевшей массы происходит выдавливание глины по направлению к морю. Несостоятельность этой гипотезы была подтверждена оползнями, происходящими на мысе Большой Фонтан в 1884 году. Описание этих событий изложено в статьях [1; 3].

Далее рассмотрим склон, существовавший до его перепланировки в районе 13-й станции Большого Фонтана. Возможное его изображение приведено на рисунке 1, а его вид после осуществленных противооползневых мероприятий показан на рисунке 2. Для изучения оползневого склона были сделаны его фототеодолитные снимки, описание которых приведены в статье [4]. Отмечено, что за 11 лет предоползневого периода с 1946 г. по июнь 1957 г. он был отмыт по краям пляжа на 8 м, а в сред-

ней его части на 6 м. Общий размыв составил 30720 м^3 или около 3000 м^3 грунта в год. Площадь пляжа уменьшилась на 1158 м^2 .

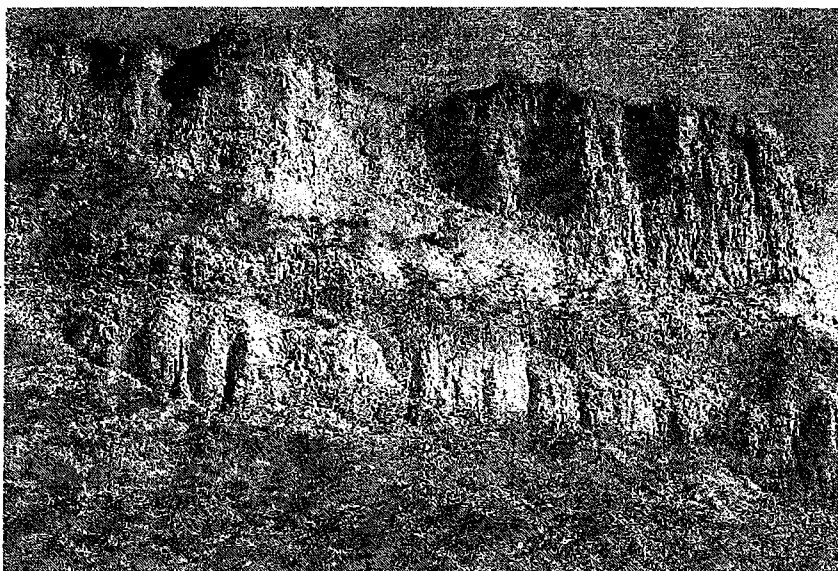


Рис. 1. Склоны на Одесском побережье, заснули или ждут...



Рис. 2. Склон на Одесском побережье после перепланировки

Перечисленные воздействия моря на склон начались после предыдущего оползня при относительной его временной стабильности. Но в это же время под действием морской абразии шла подготовка к новому оползню, который произошел в июле 1957 г. В результате суша выдвинулась в сторону моря, и основание пляжа стало примерно таким же, как было в 1946 г. Но в результате перемещения уреза воды, его площадь увеличилась на 14570 м^2 , а объем выжитой породы составил 10900 м^3 .

После окончания оползня ширина пляжа продолжала постепенно увеличиваться во времени, что объясняется послеоползневыми вязкопластическими смещениями. Но вследствие воздействия прибойных вод он со временем стал также сокращаться. Последующие съемки показали, что в 1961 г. площадь пляжа по сравнению с 1946 г. уменьшилась на 1690 м^2 . Необходимо также подчеркнуть, что перед склоном в процессе оползня и затем пластического выдавливания образуется пригрузочный массив грунта высотой 8-10 м, например, как показано на рис. 3. Он выдвигается в сторону моря, и затем частично размывается, задерживая до определенного времени развитие нового оползня.

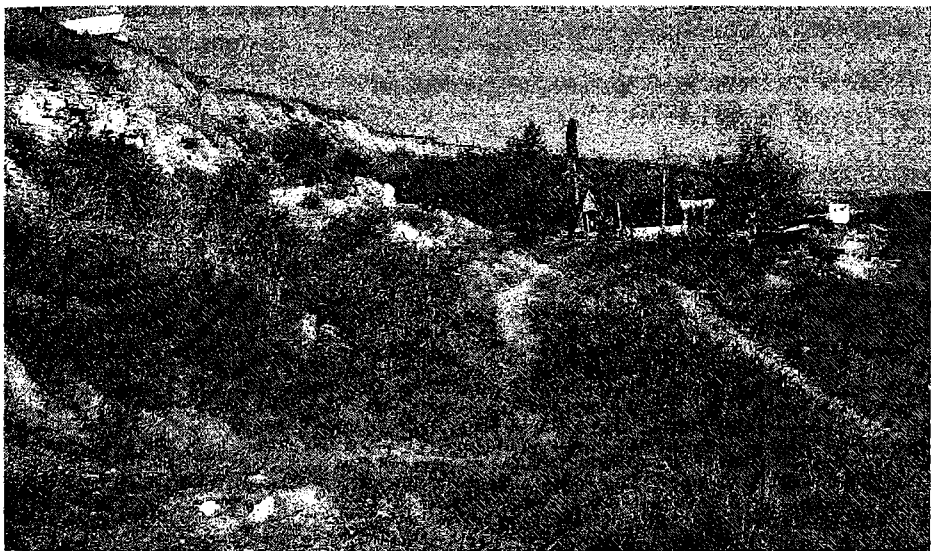


Рис. 3. Склон на Одесском побережье

По данным Д.Ф. Жаринцева с 1812 г. по 1873 г. отступление берега в некоторых местах побережья достигло 100 саженей, а по донесению смотрителя маяка на мысе Большой Фонтан расстояние между маяком и мысом с 1827 г. по 1877 г. уменьшилось на 50 саженей. Дополнительно интересно отметить, что О.Г. Нудельман в 1903 г. приводит данные го-

родского землемера А.В. Юргевича о потере за время с 1860 г. по 1900 г. участка городской земли в 18 сажен шириной и 250 сажен длиной со скоростью 0,45 сажен (0,96 м) в год. По данным И.Я.Яцко отмыв берега вблизи села Санжейки с 1953 по 1957 г. составил в среднем 1,1 м в год. Обычно размыв прибрежной территории уменьшается за счет перемещения к урезу воды мэотических глин, вызванного их пластическим течением. Но они постепенно размываются и затем начинаются обвалы оползневых ступеней. В среднем количество таких обвалов достигает 150, они сбрасывают со склонов к урезу воды до 500000 м³ грунтов.

Из анализа вышеизложенных результатов следует, что динамика развития оползневых процессов может быть представлена в виде последовательности циклов, происходящих через некоторый промежуток времени, необходимый для размыва присклонового массива грунта до некоторой критической величины. Затем склон теряет устойчивость и возникает новый оползень.

Какие же оползни наблюдаются на Одесском побережье? Сразу следует отметить, что существует большое количество их классификаций. Так, по А.М. Дранникову они подразделяются на три типа:

1. Ступенчатые оползни, когда толща пород, залегающих выше мэотических глин, смещаясь 3-4-мя ступенями, захватывая часть толщи этих глин глубиной 18-21 м и деформируя морское дно с образованием оползневой гряды шириной 20-40 м, которая впоследствии смывается волноприбоем.

2. Оползни-потоки, приуроченные к поверхности мэотических глин, оканчивающихся над пляжем и не вызывающие деформаций дна моря.

3. Ступенчатые оползни лессовых пород, приуроченные к поверхности красно-бурых глин. В последнее время Ф.В. Котлов и П.Н. Науменко выделяют четыре типа оползней, собственно разбивая второй тип по классификации А.М. Дранникова на два новых. Далее будем придерживаться классификации, данной А.М. Дранниковым.

Первый тип оползней является наиболее сложным и опасным смещением земляных масс. Он наиболее часто наблюдается на Одесском побережье. Его межоползневой период длится 40-50, а иногда и более лет. Затем на плато образуется трещина длиной 300-1500 м, ограничивающая будущий оползень, и происходит опускание отделившегося участка склона на 30-60 см, а иногда и более. Продолжительность этого процесса длится 2-4 года. После этого в течение 2-10 часов происходит следующее опускание этого участка, но уже на 8-20 м. Например, при оползне 1957 г., когда общая площадь опустившихся массивов составила 5660 м², длина оползневого склона имела 135 м, массив достиг общей глубины опускания в 8,22 м с конечной быстротой 4 см в минуту. Интересно отметить,

что повторение оползня в одном и том же створе почти никогда не происходит.

Смещение второго типа оползней, состоящего из лесса, красно-бурых глин и обломков известняка, наблюдается по поверхности мэотических глин, которая часто подвержена смятию. По данным И.Я. Яцко деформации оползших по мэотическим глинам пород между дачей Ковалевского и Люстдорфом составило до 3,22 м, а вблизи Люстдорфа – 9,11 м.

Третий тип оползней скользит по красно-бурым глинам. Так по данным И.Я. Яцко, на 11 станции Большого Фонтана после оползня 1937 г., в 1947 г. зарегистрирован откол кромки плато шириной 1 м, длиной 12 м. В ноябре 1948 г. отмечен в том же месте новый откол шириной 6 м и длиной 12 м. Два новых откола повторились в этом же году, а также вновь происходили в 1950 и 1957 гг.

В июне 1958 г. в Одессе было проведено научное совещание по изучению Одесских оползней. В его работе принимали участие 180 высококвалифицированных специалистов высших учебных, проектных, научно-исследовательских и академических институтов и других учреждений. В докладах были освещены вопросы борьбы с оползнями на Одесском побережье и определено дальнейшее направление их изучения. Публикация основных докладов приведена в трудах Одесского государственного университета [5]. Первый вопрос, который стоял на этом совещании, был о причинах происхождения оползней.

А.М. Дранников считал, что возникновение оползней первого типа связано с деформацией толщи мэотических глин под действием вышележащих грунтов, т. е. выдавливания глин из области наибольшего природного давления. В мэотических глинах все поры заполнены водой, поэтому подземные воды в толще известняка и лесса не играют решающей роли в возникновении оползневых деформаций, они только способствуют их росту. Эти воды увлажняют грунты ранее оползших ступеней, разрушая их и увеличивая крутизну склона, при которой возобновляются деформации, приводящие к новым оползням. Задержка процесса подготовки оползня связана с явлениями ползучести грунта. Большую роль в развитии оползневого процесса играет отрыв волноприбоем валов выдавливания и ступеней предыдущих оползней, которые являются противодавлением, улучшающим устойчивость склона. При этом средняя скорость размыва пород превышает среднюю скорость поступления оползневых масс в нижнюю часть склона. Так при оползне 1861 г. отмечено, что морское дно после обвала вышло наружу на протяжении 640 м в длину и до 42 м в ширину, которое затем было размыто. Оползни второго типа в основном распространены на побережье от балки Ковалевского и до Люстдорфа. Одной из причин их развития является малая мощность и прочность известняков серьезно не препятствующих

оползням. Этому также способствуют подземные воды и атмосферные осадки.

В докладе А.А. Чужмира отмечались следующие вопросы. На Одесском побережье невозможно указать оползневой участок, на котором бы в различное время не наблюдались все три типа смещений по классификации А.М. Дранникова. Он считал, что в расчетах необходимо учитывать пластические свойства мэотических глин. Такая приближенная процедура расчета была им выполнена в 1953 г. для склона в районе стадиона «Динамо» с использованием несовершенных формул профессора И.В. Яропольского [6]. Проанализированы происшедшие динамические процессы на участке склоне напротив стадиона «Динамо», начиная с оползня 1918 г. и по оползень 1953 г., которые здесь рассмотрим подробнее.

В результате оползня 1918 г. склон стал более устойчивым за счет выдвигания суши в море и ее уширения, вызванного разрушением части плато. Новое формирование склона продолжалось под действием поверхностных вод и вод первого подземного горизонта, которые разрушали толщу лесса, перемещая его в виде оплывней вниз по склону (третий тип оползней), сглаживая его поверхность. Затем с течением времени устойчивость склона ухудшается. Под действием второго понтического водоносного горизонта происходит подвижка по поверхности мэотических глин масс известняка и красно-бурых глин, увеличивая перепад высот у кромки плато (второй тип оползней). В это же время прибойные волны размывают вал выпирания в море. Указанные изменения в склоне приводят к появлению трещины на плато. Часть плато, ограниченная трещиной, начинает опускаться вниз, вызывая появление в море новых валов выпирания, которые размываются волнами. Все это свидетельствует о том, что начинается оползень первого типа, который включает толщу мэотических глин, перешедших в пластическое состояние. Затем происходит быстрое обрушение склона и начинается новый цикл подготовки к очередному оползню. Прохождение описанного цикла составило 35 лет. Предыдущий цикл этого же склона, начиная с оползня 1905 г. длился только 13 лет.

В докладе приводятся следующие интересные факты. С 1863 г. по 1955 г. на участке от Ланжерона до Аркадии прирост площади оползневого склона в сторону плато составил 37 га, т. е. происходит его уположение. После наблюдения за пунктами городской территории, расположенными на плато в значительном отдалении от оползневой зоны, за период с 1940 г. по 1955 г. было установлено, что происходит их движение в сторону моря со средней скоростью 20 см в год.

В большом докладе Н.А. Хренникова дан анализ состояния склонов Одесского побережья от города Одесса и до Люстдорфской балки,

начиная с 1935 г. и до 1958 г. В статье приведено много фотографий склонов и оползней, причем некоторые из них повторяют отдельные оползни, снятые с одних и тех же позиций через 50 лет. Например, известная многим одесситам бухточка «Золотой бережок», которая мало изменилась за эти полвека. В настоящее время она обнесена с суши, видимо новым владельцем, высоким глухим забором. Были сделаны следующие основные выводы и замечания. В районе стадиона Динамо и Киностудии при ширине оползневого склона до 320 м не создается достаточно мощного контрфорса и при новом оползне весь склон передвигается к морю. Расширение склона с 1940 г. по 1955 г. достигло 60 м. Оползни в этом районе были настолько часты, что до наступления нового оползня море не успевает отмыть массу грунта, поступившую на склон от предыдущего оползня. Поэтому сделано очень важное для автора предположение, что абразия моря не является основной причиной, вызывающей оползень, но способствует разрушению берега и передвижению уреза воды внутрь материка. Наоборот, некоторые районы Одесского побережья имеют небольшую ширину склона к морю (10-50 м), но являются очень устойчивыми (например, побережье Малого Фонтана, южная сторона мыса Большой Фонтан и т. д.). Анализируя состояние оползневого района Ланжерон – Киностудия, где в 1953 г. произошел крупнейший оползень длиной около 2-х км, сделано следующее своеобразное заключение. Главными причинами возникновения и развития оползней в Одессе являются вертикальные обрывы коренного плато, а также подземные и поверхностные воды. Основными источниками этих вод служат потери из водопроводных и канализационных сетей и атмосферные осадки. Поэтому надо считать полезным мероприятием устройство дренажных скважин и галерей со штольнями.

В докладе Е.П. Емельяновой содержатся некоторые противоположные утверждения. Фактических данных о механизме смещения одесских оползней нет, есть только гипотезы. Но совершенно ясно, что возникновение оползней связано с деформациями, происходящими в толще мезотических глин. Их причиной является возрастание касательных напряжений при уменьшении ширины оползневой террасы вследствие морской абразии. Если не приостановить подрезку основания склона морем, которая приводит к увеличению этих напряжений, то невозможно добиться прекращения дальнейшего развития оползней. Полное отсутствие понтического водоносного горизонта не может приостановить развитие оползней. Лучшим доказательством является крупный оползень 1953 года, произошедший на участке побережья, который был дренирован Лермонтовской галереей. Поэтому сооружение дренажа на всем побережье является напрасной тратой средств (к такому же заключению в своем докладе пришел И.С. Рогозин). Вследствие малого запаса устойчивости

некоторых склонов, а также возможного со временем их дополнительного смещения, например от разбухания грунтов, возможны небольшие постепенно затухающие оползневые подвижки.

На основании обширных натуральных наблюдений за оползневыми процессами склонов, расположенных на участке между оврагами балок Безымянной и Ковалевского, начиная с января 1964 г. по декабрь 1965 г., П.Н. Науменко в статье [9] был проведен их анализ и обобщения, которые заключаются в следующем. Оползни, которые возникли 29.02.1964 г. и 14.12.1965 г., имели блоковое строение, и их смещение происходило в мэотических глинах на глубине 10-25 м по поверхностям скольжения. Они протекали следующим образом. В головной части оползня лессовидные породы и известняки рассекались почти вертикальной трещиной, которая в мэотических глинах принимала криволинейный очертание, затем в средней части склона и в языковой части оползня она занимала горизонтальное положение. К такому же результату на основании экспериментальных данных пришел и М.Н. Гольдштейн [10]. Ранее по гипотезе Н.Я. Денисова считалось, что оползни возникали путем пластического выдавливания мэотических глин под действием высокого градиента давления, но не путем скольжения. Существенную роль в увеличении сил, вызывающих оползневое смещение, играют обвалы и оползни лессовидных суглинков. Они пригружают верхнюю часть склона, активизируя этим оползневые смещения. Началом каждого нового оползневого цикла, возникающего в оползневой зоне, можно считать образование характерной трещины на плато. Оползневые смещения не прекращаются как до катастрофических подвижек, так и после них, и имеют одни и те же направления векторов перемещений, отличаясь только величиной. Это вызвано постоянным размывом моря подводной и надводной частей оползневого склона, который исключает возможность самозатухания оползневых процессов. Развитие оползневых смещений на склоне также определяется изменением во времени прочностных характеристик пород, образующих склон.

Если принять стоимость всех затрат на основные работы по стабилизации склонов за 100%, то по отдельным видам работ эти затраты распределяются следующим образом. Стоимость берегозащитных сооружений в виде подводных волноломов и бун 59,7%; дренажных галереи и штольни 23,7%; вертикальной планировки и сооружения по регулированию поверхностного стока вод 13,44%; уполоаживания оползневого склона 3,16%. Видим, что наиболее дорогой является защита побережья от морской абразии. Это вызвано слабостью пород, слагающих морское дно, и обедненностью естественного потока наносов, вызванного постройкой морских гидротехнических сооружений Ильичевского порта, преграждающих их движению. Поэтому стоимость подготовки основания берегоза-

щитных сооружений и завоз большего количества песка для пляжей очень велика. Неэффективность тех или иных сооружений потребует огромных средств, затраченных впустую. С другой стороны, отказ от их строительства может привести к большим затратам в период эксплуатации пляжей и других противоползневых сооружений. Далее, не все мероприятия в силу объективных причин могут быть осуществлены. Например, для снятия перепада давлений на мзотические глины, являющегося одним из основных факторов возникновения оползней, потребуется срезка верхней части откоса и пригрузка его подножья. В условиях Одессы это приведет к потере ценных участков земли, сносу целого ряда жилых и курортных строений и к уничтожению дорог и зеленых насаждений, что нельзя на некоторых участках плато признать целесообразным. Постройка на берегу и в море контрбанкета для пригрузки нижней части склона потребует возведения для его защиты крупнейших гидротехнических сооружений, что стоит очень больших средств. Этим собственно и объяснялась острота дискуссий совещания 14-18 июня 1958 г., которая закончилась принятием без существенных изменений проекта в 1958 году по защите Одесского побережья от оползневых процессов.

Описание склонов на участке Приморского бульвара от балки Военной до балки Карантинной на основании инженерно-геологических исследований было выполнено в работе [12]. С этого места собственно и начиналась Одесса и строительство порта. Одно из таких исторических мест показано на рисунке 12. Склон Приморского бульвара в XIX веке представлял собой стабилизировавшийся двух и трех ступенчатый оползень, который был уположен, спланирован и закреплен у основания нижней оползневой террасы подпорной стенкой. В настоящее время этот участок укреплен и фактически развитие глубоких оползней исключено. Этому способствовало укрепление склонов дополнительными подпорными стенами, отсыпка в море около 1 млн. м³ различного грунтового материала для расширения территории и постройки портовых сооружений. При возведении Потемкинской лестницы под ее фундаменты в мзотические глины было забито 400 деревянных свай. Дополнительно в процессе планировочных работ, начиная от нижней подпорной стенки и до крайней аллеи бульвара, на участке от лестницы до мэрии было отсыпано еще около 400 тыс. м³ грунта. Здесь был разбит сад, названный одесситами «лунным», и устроен грот. Строительство порта устранило подмыв основания склонов морскими волнами, что являлось основной причиной образования оползней. Однако в 1965-1970 гг. вдоль верхней бровки склона на участке от Потемкинской лестницы до мэрии произошли его деформации. В 1969 г. появились деформационные трещины на видовой площадке памятника «Пушка», которые в дальнейшем прогресси-

ровали. В 1972 г. трещина разрыва достигла 1-2 см и отчленила блок длиной 5-8 м и шириной от 1,5 до 3,5 см, при этом, восточная часть площадки заметно наклонилась в сторону моря. В асфальтовом покрытии напротив гостиницы «Одесса» появилась трещина 56-ти метровой длины, которая в 1972 г. имела ширину 10 см и величину сброса 15 см. Но деформации оползневой характера на подпорных стенках не наблюдались. На Комсомольском бульваре также были отмечены трещины, обрушения парапета и провалы диаметром 40-50 см и глубиной 10-20 см. Затем были выполнены большие работы по выявлению причин, вызвавших эти смещения, и по их устранению. Совместно с натурными исследованиями были произведены расчеты по определению напряженного состояния склонов по приближенному методу профессора Н.Н. Маслова [11] и разработаны и реализованы мероприятия по стабилизации склонов в районе Комсомольского и Приморского бульваров.

Работы по укреплению побережья первой очереди начались в 1959 году со строительства бун и завоза песка для создания пляжей. Но принятая длина бун 40-50 м не позволила сохранять стабильным песчаный пляж. Поэтому в 1961 г. был разработан проект, позволяющий удерживать песок также с помощью волнолома и системы траверсов. Вначале строились надводные волноломы, но затем стали возводить волноломы подводного типа. В 1964 г. проект противооползневых мероприятий был окончательно откорректирован и склоны должны были принимать примерно такой вид, как показанный на рисунке 4.

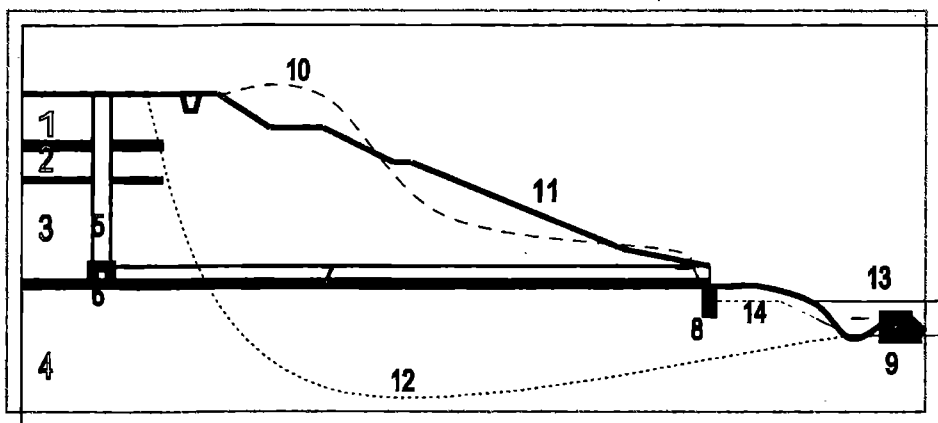


Рис. 4. Разрез оползневого склона

1 – лесс; 2 – красно-бурые глины; 3 – известняк; 4 – маотические глины; 5 – фильтросквасжина; 6 – галерея; 7 – итольня; 8 – подпорная стенка; 9 – волнолом; 10 – склон до улолаживания; 11 – улоложенный склон; 12 – поверхность сдвига; 13 – уровень моря; 14 – искусственный пляж

Первая и вторая очередь этого проекта были в основном осуществлены. Затем последовала полоса застоя в мероприятиях по дальнейшему уположению склонов, строительству новых и поддержанию возведенных противооползневых сооружений в нормальном эксплуатационном состоянии. В тоже время начала процветать хаотичная и запрещенная законом частная, не подтвержденная научно обоснованными расчетами, застройка склонов, которая со временем может привести к непредсказуемым последствиям.

Какая же динамика оползневых склонов наблюдается после выполнения противооползневых мероприятий? Вначале необходимо отметить, что планировочные работы на склонах увеличили их неоднородность за счет перераспределения по площади склона лессовых пород. Дренажные скважины для перехвата подземных вод оказались малоэффективными, а существующие ранее пути тока вод были нарушены.

В оползневые области продолжало поступать до 60% воды, что привело к повышению влажности грунта, увеличению его веса и уменьшению прочности. Все это вызывает деформации откосов даже при их существенном запасе устойчивости, полученном в результате выполненных противооползневых работ.

На основании наблюдений, полученных Одесским противооползневым управлением, отмечено, что деформации склонов продолжались и после строительства противооползневых сооружений, но не носили катастрофического характера и не приводили их к существенным перемещениям. Так, продолжали развиваться трещины закола на оползневых террасах, некоторые возникшие деформации улавливались штольнями в виде горизонтальных и вертикальных смещений тубингов крепления. На некоторых участках были деформированы асфальтовые шоссе, дорожки, капитальные лестницы и подпорные стены. В 1972 г. между 12 и 13 станциями Большого Фонтана произошла подвижка нижней оползневой террасы, общая протяженность трещин растяжения достигла 470 м, а максимальная амплитуда сброса составляла 1 м. В море, в приурезовой зоне был отмечен прерывистый вал выдавливания на расстоянии 1-2 м от уреза воды длиной около 350 м и высотой 0,5 м. В настоящее время этот участок склона укреплен. Развитие деформаций в верхней части склона не отмечались. Следует особо отметить, что в бывших зонах активных оползней новых деформаций не наблюдалось. После выполнения дополнительных ремонтных работ подвижка склонов уменьшалась, а в некоторых случаях наступала их стабилизация.

На участках, где не выполнялись противооползневые мероприятия, продолжалось активное развитие оползневых процессов. Так, в районе 12-13 станций Черноморской дороги произошел глубокий катастрофический оползень. От плато отделился блок склона длиной 130 м и

шириной 25 м, который опустился на глубину 10 м. Фронт деформаций по склону составил 520 м, был отмечен вал выпирания высотой до 1 м и длиной 100 м. На участке мыс Большой Фонтан – Люстдорф за период 1971-1972 гг. произошло 5 крупных и целая серия мелких оползней. Таким образом, в районах побережья, где отсутствовали противооползневые сооружения, продолжается активное развитие оползневых процессов.

В настоящее время разработаны более совершенные упруговязкопластические модели грунтовых сред, которые в большей степени согласуются с реальной природной обстановкой склонов и оползней, и программные комплексы, позволяющие их реализовать на современных ЭВМ [8]. Были выполнены исследования по уточнению исходных данных, моделей Одесских склонов и расчеты их устойчивости на современном научном уровне. Они будут приведены в следующих публикациях.

Посмотрите несколько фотографий о современном состоянии склонов и противооползневых сооружений.



Рис. 5. Требуется капитальный ремонт неудачной конструкции, море наглядно подтвердило это

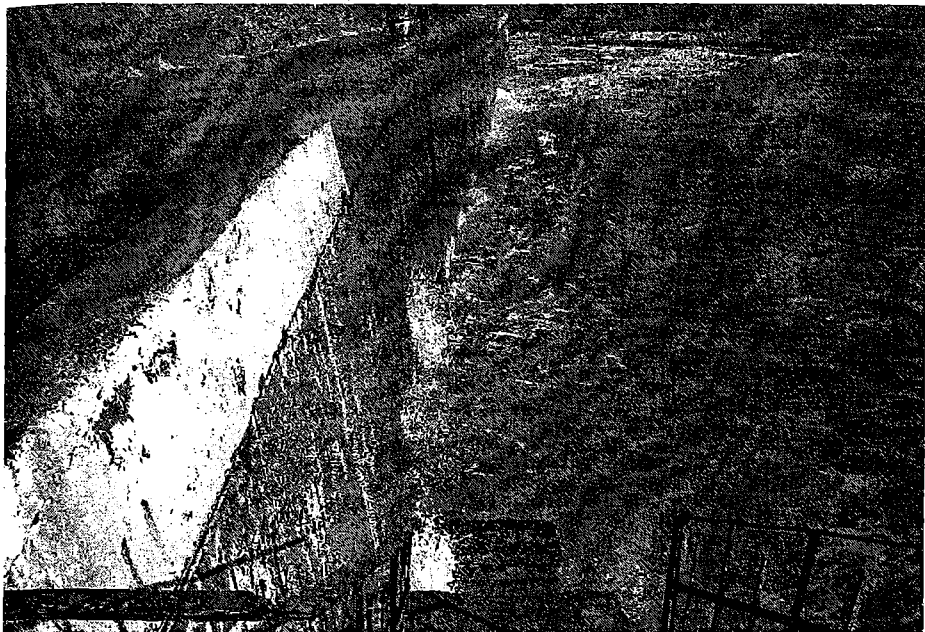


Рис. 6. Пляж размыт, нависла угроза разрушения стены, а затем и берега

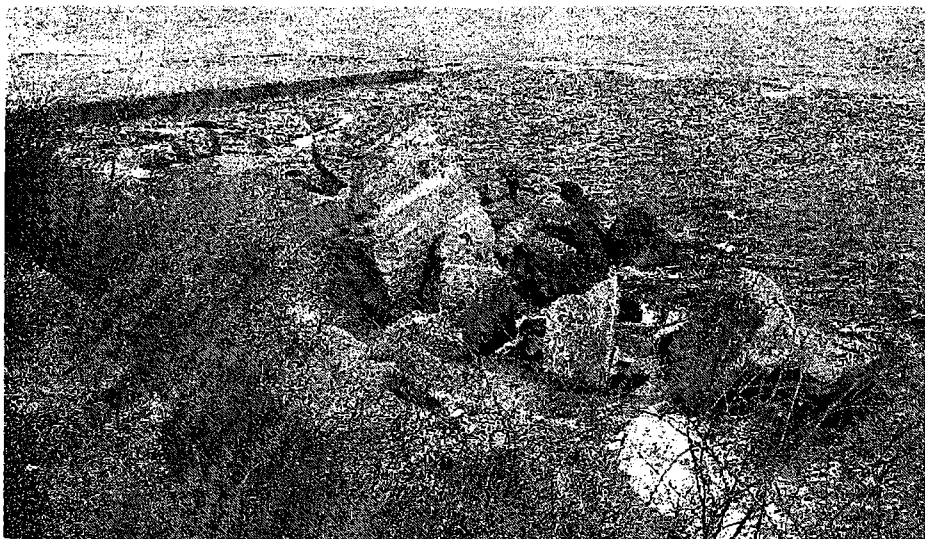


Рис. 7. Остатки размытого морем оползня. Ностальгия об ушедших Одесских пляжах. Вдали видна буна, а под гребнем волны расположен подводный волнолом, которых тогда не было



Рис. 8. Требуется ремонт покрытия, рядом на плато расположены монастырь и духовная семинария. Духовным лицам и прихожанам тоже не мешает в нормальных условиях окунуться в море



Рис. 9. Основание склона с бывшим, но современным входом в катакомбы

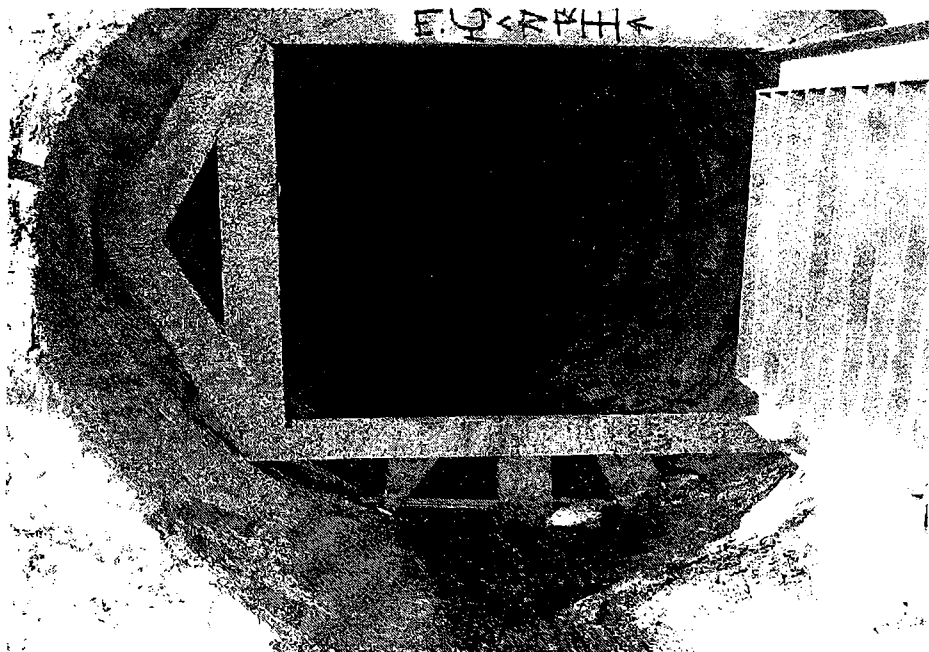


Рис. 10. Вход в штольню открыт, но не для экскурсий



Рис. 11. Не ошибитесь, это тоже Одесса (Аркадия), сооружение воздвигнуто на террасе склона

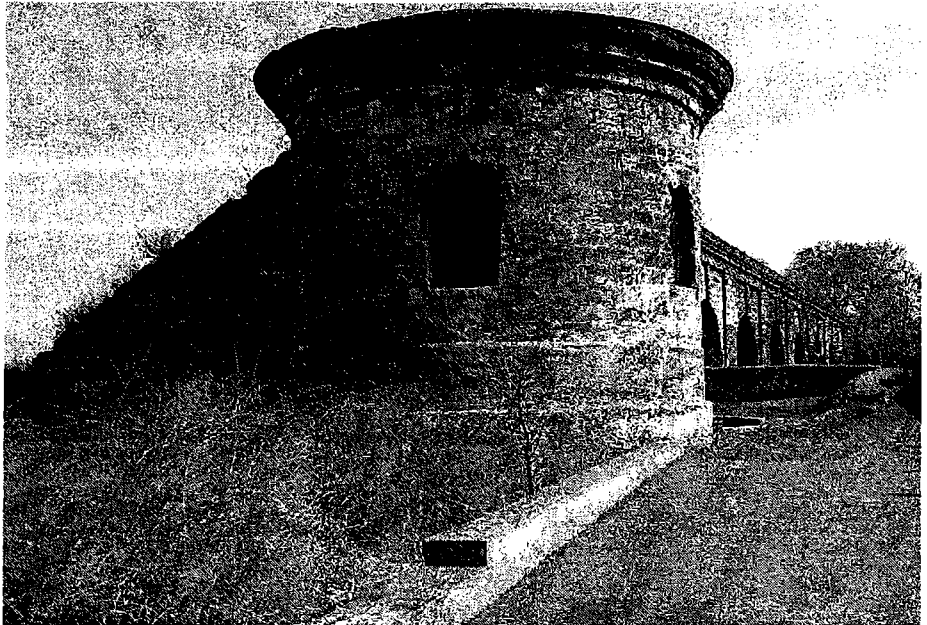


Рис. 12. Отсюда начиналась Одесса, знаменитая также своими оползнями

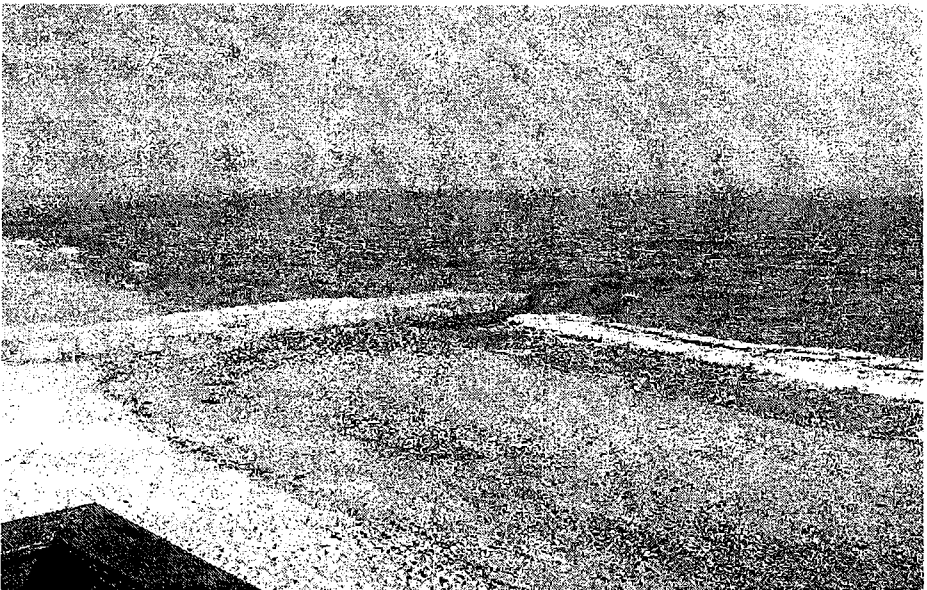


Рис. 13. Одесские пляжи, основа сохранения устойчивости беспокойных склонов и конечно здоровья одесситов

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин В. А., Гришин А. В. Одесские склоны и оползни // *Вісник ОНМУ*. – 2007. – Вип. 22. – С. 3-19.
2. Гришин В. А., Гришин А. В. Склоны Одесского побережья // *Вісник ОНМУ*. – 2007. – Вип. 24. – С. 3-16.
3. Жаринцевъ Д. Ф. О причинахъ обваловъ обрывистого морского берега въ окрестностяхъ г. Одессы и мерахъ, которыя необходимо принять для предупрежденія обрушенія берега у Одесского маяка. – Санктпетербургъ, типографія Императорской академіи наукъ, 1886. – 40 с.
4. Хренников Н. А., Кустова Т. И. Динамика склонов и пляжей на Одесском побережье // *Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними*. – К.: Изд-во Киевского ун-та. – 1964. – С. 132-137.
5. *Материалы по изучению Одесских оползней* // *Труды Одесск. госуд. ун-та им. И.И. Мечникова*. – Одесса, 1960. – С. 158.
6. Яропольский И.В. Основания и фундаменты. – Л.: Водтрансиздат. 1954. – 455 с.
7. *Оползни Черноморского побережья Украины*. – М.: Недра, 1977. – 103 с.
8. Гришин В. А., Дорофеев В. С. Некоторые нелинейные модели грунтовой среды. – Одесса: Внешрекламсервис, 2007. – 310 с.
9. *Инженерная защита берегов Черного моря*. – К.: Будівельник, – 1968. – 57 с.
10. Гольдштейн М. Н., Туровская А. Я., Тимофеева Т. А. и др. Исследование глубоких оползней Одессы. // *Вопросы геотехники*. № 12. – К.: Будівельник. – 1968. – С. 7-36.
11. Маслов Н. Н. *Механика грунтов в практике строительства*. – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
12. Демчишин М.Г. *Современная динамика склонов на территории Украины*. – К.: Наукова думка, 1992. – 255 с.

Надійшла 20.02.08

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРКА КРАНОВ МОРСКОГО ПОРТА

Построена модель оптимизации структуры и использования парка кранов морского порта по критерию максимума суммарной дисконтированной прибыли за плановый период, позволяющая формировать структуру парка кранов с учетом технологических схем эксплуатации и ожидаемых грузопотоков.

Ключевые слова: парк кранов, порталный кран, мобильный кран, вариант эксплуатации, ремонт, производительность, грузы, тариф, затраты, горизонт планирования.

Свыше 70% грузов в морских портах перерабатываются перегрузочными комплексами с крановой схемой механизации грузовых работ.

Актуальность проблемы обновления парка порталных кранов морских портов Украины обусловлена их предельным физическим износом. Износ кранового хозяйства морских портов Украины превышает 95%. Порты оснащены, в основном, порталными кранами морально устаревших конструкций с шарнирно-сочлененной стреловой системой, возраст некоторых из них превышает 50 лет (табл. 1).

Из-за конструктивных особенностей кранов и принятых технологических схем средний коэффициент использования порталных кранов отрасли составляет $K_{исп} = 0,29$.

Свыше 20% парка кранов имеют $K_{исп} = 0,01 \dots 0,07$ (табл. 2).

Сформировавшееся в отрасли направление обновления портов новыми порталными кранами за счет их изготовления на отечественных заводах требует анализа и обоснования экономической целесообразности.

Известно, что на отработку качественной технологии изготовления портового крана требуются десятки лет.

Наполнение отрасли морально устаревшими конструкциями порталных кранов, которые имеют проблемы с качеством, может оказаться экономически убыточным для портов и отрасли.

В соответствии с современными тенденциями в мировой практике, передовые порты, в том числе порты России (Санкт-Петербург, Новороссийск, Туапсе, Ванино, Находка, Восточный и др.), ориентированы на оснащение кранами нового поколения – мобильными, портално-мобильными.

Таблица 1

Основные показатели парка портальных кранов портов (2003–2007 гг.)

№ п/п	Порты	Кол-во кранов					Средний возраст (лет)							Средний коэффициент использования парка кранов					
		По Реестру	2003	2004	2005	2006	2007 (1-3 кв.)	По Реестру	2003	2004	2005	2006	2007 (1-3 кв.)	2003	2004	2005	2006	2007 (1-3 кв.)	
1	Б. – Днестровский	24	23	22	22	22	22	27,0	26,4	27,4	28,1	29,3	30,3	30,3	0,21	0,25	0,28	0,27	0,22
2	Бердянский	34	35	35	35	35	35	23,3	23,3	24,3	25,3	26,3	27,3	27,3	0,49	0,40	0,30	0,23	0,24
3	Генический	4	4	1	1	1	1	23,5	23,5	25,0	26,0	27,0	28,0	28,0	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
4	Евпаторийский	5	5	4	4	4	4	23,6	23,6	24,3	25,3	26,3	27,3	27,3	нет данных	0,28	0,38	0,37	0,24
5	Измаильский	54	53	53	53	53	53	26,3	26,1	27,1	28,1	29,1	30,1	30,1	0,32	0,40	0,40	0,36	0,32
6	Ильичевский	109	109	107	105	105	105	31,9	31,9	32,7	33,3	34,3	35,3	35,3	0,31	0,27	0,24	0,22	0,18
7	Керченский	30	31	34	34	34	34	27,5	27,5	27,9	28,9	29,9	30,9	30,9	0,20	0,41	0,38	0,43	0,41
8	Мариупольский	55	57	57	58	59	60	22,8	22,0	23,0	22,9	23,5	24,1	24,1	0,46	0,40	0,43	0,48	0,46
9	Николаевский	36	36	36	37	37	37	25,4	25,4	26,4	27,4	28,4	29,4	29,4	0,39	0,37	0,34	0,32	нет данных
10	Одесский	77	79	78	78	78	78	25,1	25,0	25,8	26,4	27,1	28,1	28,1	0,23	0,21	0,23	0,37	нет данных
11	Октябрьский	20	20	20	20	20	20	24,6	24,6	25,6	26,6	27,6	28,6	28,6	0,16	0,10	0,20	0,23	0,30
12	Ренійский	54	54	54	54	53	53	24,1	24,1	25,1	26,1	27,1	28,1	28,1	0,06	0,12	0,14	0,09	0,13
13	Севастопольский	4	4	4	3	3	3	20,8	20,8	21,8	23,7	24,7	25,7	25,7	0,22	0,22	0,20	0,25	0,20
14	Скадовский	4	4	4	4	4	4	24,5	24,5	25,5	26,5	27,5	28,5	28,5	0,04	0,07	0,02	0,04	0,05
15	Усть-Дунайск	4	4	4	4	4	4	22,3	22,3	23,3	24,3	25,3	26,3	26,3	нет данных	нет данных	0,17	нет данных	нет данных
16	Феодосийский	15	16	16	17	18	18	23,6	23,6	24,6	25,3	24,9	25,9	25,9	0,20	0,25	0,22	0,25	0,26
17	Херсонский	18	18	18	17	17	17	26,1	26,4	27,4	28,0	29,0	30,0	30,0	0,26	0,46	0,48	0,43	0,40
18	Южный	34	35	38	39	39	39	15,4	15,0	15,6	16,2	17,2	18,2	18,2	0,48	0,58	0,43	0,47	0,51
19	Ялтинский	6	5	5	5	5	5	25,7	24,4	25,4	26,4	27,4	28,4	28,4	нет данных	0,20	0,79	0,70	0,57
Итого по отрасли:		587	592	591	590	591	592	25,6	25,4	26,3	26,9	27,8	28,8	28,8	0,30	0,31	0,29	0,32	0,30

Таблица 2

Портальные краны с коэффициентом использования 0,00-0,07 (2002-2006 гг.) по отраслям

№ п/п	Порты	Кол-во кранов в порту		Средний коэффициент использования												Всего	
		2002 г.	2006 г.	0,00		0,01		0,02-0,03		0,04-0,05		0,06-0,07		2002 г.	2006 г.		
				2002 г.	2006 г.	2002 г.	2006 г.	2002 г.	2006 г.	2002 г.	2006 г.	2002 г.	2006 г.				
1	Б-Днепровский	24	22	4	2	-	2	2	2	1	-	-	2	-	9	6	
2	Бердянский	34	35	-	-	-	-	1	1	2	1	-	-	1	3	3	
3	Генический	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	нет данных	нет данных	
4	Евпаторийский	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	нет данных	нет данных	
5	Измальныйский	54	53	2	2	1	-	2	1	1	1	-	-	6	5	5	
6	Ильичевский	109	105	7	13	3	4	6	7	4	4	2	2	22	30	30	
7	Керченский	30	34	-	-	-	-	2	2	-	2	3	-	7	0	0	
8	Мариупольский	55	59	-	2	-	-	2	3	-	-	-	-	2	5	5	
9	Южный	34	39	2	2	-	-	-	-	-	1	-	-	2	3	3	
10	Николаевский	36	37	1	1	-	2	1	-	-	-	-	-	2	3	3	
11	Одесский	77	78	-	4	-	1	-	-	5	1	1	3	6	9	9	
12	Ренийский	54	53	14	15	4	2	8	2	2	-	9	-	37	19	19	
13	Севастопольский	4	3	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	
14	Скадовский	4	4	1	2	1	-	-	1	1	-	-	-	3	3	3	
15	Октябрьский	20	20	-	-	-	-	-	-	-	2	-	4	0	6	6	
16	Усть-Дунайский	4	4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	
17	Феодосийский	15	18	1	3	-	1	1	1	1	-	-	1	3	6	6	
18	Херсонский	18	17	-	3	-	-	-	-	1	-	-	1	1	4	4	
19	Ялтинский	6	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	нет данных	нет данных	нет данных	
Итого:		587	591	33	52	9	12	25	18	20	10	17	13	104	105	105	

По конструктивным особенностям и эксплуатационным характеристикам такие краны имеют значительные преимущества перед порталными кранами традиционных конструкций. Так, $K_{исп}$ таких кранов достигает 0,8-0,85 (например, порты Новороссийск, Туапсе).

При равных параметрах грузоподъемности у мобильных кранов в 1,5 раза меньше масса и габариты крана, меньше нагрузка на причал, энергопотребление на 30% ниже, чем у порталных кранов.

Крупные плановые ремонты (текущие, капитальные) для таких кранов не предусматриваются в связи с тем, что в период технического обслуживания осуществляется последовательная плановая замена отдельных компонентов согласно расчетному сроку эксплуатации (20...25 лет). Такая система планово-предупредительных ремонтов обеспечивает резкое снижение затрат на ремонты, а также простои на ремонтах.

Сравнению характеристик альтернативных моделей порталных и мобильных кранов посвящен ряд публикаций последнего времени [1-5].

Критерии оптимальности структуры парка перегрузочного оборудования порта обосновываются в работе [6], выбор стратегии развития парка перегрузочного оборудования порта в условиях неопределенности рассматривается в работе [7].

В работе [8] оптимизируются сроки эксплуатации порталных кранов по критерию интенсивности прибыли, а в работе [9] – построена общая модель оптимизации стратегии развития парка кранов морских портов.

Зависимость оптимальной стратегии обновления парка кранов от горизонта планирования исследована в работе [10].

Построенные в перечисленных статьях модели носят общий, концептуальный характер. Так, при охвате множества портов не учитываются конкретные грузопотоки и варианты использования кранов, либо оптимизируются сроки эксплуатации отдельного крана без учета ситуации в конкретном порту.

Целью настоящей статьи является построение многопараметрической модели оптимизации структуры парка кранов порта, в том числе с учетом времени приобретения и видов кранов, использования кранов с учетом их технологической совместимости, возможных вариантов эксплуатации, ожидаемых грузопотоков и тарифов.

Введем следующие обозначения.

Внешние параметры:

T – горизонт планирования (количество лет в рассматриваемом плановом периоде), $t = \overline{1, T}$;

m – количество типов грузов (насыпные, штучные, контейнеры), $i = \overline{1, m}$;

n – количество видов кранов (портальные, мобильные – разных моделей), $j = \overline{1, n}$;

J – множество несовместимых между собой видов кранов;

L_j – количество $k = \overline{1, l_j}$, вариантов эксплуатации крана J (прямые, складские), $j = \overline{1, n}$;

$Z_j(t)$ – стоимость крана вида J (с учетом затрат на монтаж крана и строительство/переоборудование причала под кран J) в году t , $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$;

R_{jk} – удельные эксплуатационные затраты по варианту k эксплуатации крана вида J , $k = \overline{1, l_j}$, $j = \overline{1, n}$;

$r_j(u)$ – затраты на ремонты крана вида J при сроке его эксплуатации u , $j = \overline{1, n}$, $u = \overline{1, T}$;

$\tau_j(u)$ – продолжительность временных потерь (на монтаж и ремонты) крана вида J при сроке его эксплуатации u , $j = \overline{1, n}$, $u = \overline{1, T}$;

μ_{ijk} – производительность крана вида J в варианте эксплуатации k по грузу типа i , $k = \overline{1, l_j}$, $j = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$;

$Q_i(t)$ – прогнозируемый грузопоток по грузу типа i в году t , $i = \overline{1, m}$, $t = \overline{1, T}$;

$P_i(t)$ – прогнозируемый тариф (доля тарифа, приходящаяся на краны) за переработку единицы груза типа i в году t , $i = \overline{1, m}$, $t = \overline{1, T}$;

K_{jk} – коэффициент продуктивного использования (с точки зрения охватываемого судопотока) крана J по варианту эксплуатации k , $k = \overline{1, l_j}$, $j = \overline{1, n}$;

τ – календарный период эксплуатации крана в год;

α – ставка дисконта.

Параметры управления:

$x_j(t)$ – количество кранов вида J , приобретаемых в году t , $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$;

$x_{ijk}(t)$ – количество кранов вида J , работающих по варианту эксплуатации k по грузу типа i в году t , $j = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, l_j}$, $i = \overline{1, m}$, $t = \overline{1, T}$.

Модель оптимизации структуры и использования парка кранов морского порта по критерию максимума суммарной дисконтированной прибыли имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & \prod_{t=1}^T (1 + \alpha)^{-t} \\
 & \sum_{i=1}^m P_i(t) Q_i(t) - \sum_{j=1}^n Z_j(t) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{l_j} R_{jk} K_{jk} x_{ijk}(t) \tau - \\
 & \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^t r_j(t-s) x_j(s) = \max_{\{x_j(t), \{x_{jk}(t)\}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{l_j} \mu_{ijk} K_{jk} x_{ijk}(t) \tau = Q_i(t), \quad i = \overline{1, m}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{l_j} x_{ijk}(t) \tau - \sum_{s=1}^t x_j(s) (\tau - \tau_j(t-s)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{j_1}(t) - \sum_{t=1}^T x_{j_2}(t) = 0, \quad (j_1, j_2) \in J, \quad (4)$$

$$x_j(t) \geq 0, \quad x_{ijk}(t) \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, l_j}. \quad (5)$$

Максимизируемая целевая функция (1) представляет собой дисконтированную разность между доходами от использования парка кранов и затратами на их приобретение, монтаж, эксплуатацию и ремонты, а также на возможное строительство/переоборудование причалов.

Ограничение (2) обеспечивает освоение заданного грузопотока каждого вида грузов в каждый период времени с помощью того или иного распределения приобретенного парка кранов.

Ограничение (3) обеспечивает ситуацию, когда время использования кранов каждого вида по всем грузам и вариантам не превышает суммарного бюджета времени кранов данного вида с учетом их простоев в ремонтах и при монтаже.

Ограничение (4) позволяет учесть попарную несовместимость тех или иных видов кранов (например, одновременное использование мобильных кранов с порталными).

Ограничение (5) обеспечивает неотрицательность всех параметров управления модели.

Укажем, что модель (1)-(5) позволяет оптимизировать как структуру парка кранов по видам (количество приобретаемых кранов того или иного вида по годам планового периода), так и их распределение по вариантам эксплуатации и перерабатываемым грузам в каждом году рассматриваемого периода.

В приведенной постановке модель (1)-(5) описывает формирование по годам и последующее использование парка кранов нового порта, однако при задании соответствующих начальных условий (наличия парка кранов в начальный момент времени) она применима и для оптимизации стратегии обновления парка кранов действующего порта.

В дальнейших исследованиях предполагается:

- детализация построенной модели путем рассмотрения конкретных вариантов эксплуатации кранов с учетом их взаимодействия;
- обобщение построенной модели путем введения зависимости величины ожидаемого грузопотока от устанавливаемого портового тарифа и времени переработки грузов, которое, в свою очередь, зависит от структуры парка кранов;
- построение многоуровневой системы моделей, в которой результаты решения локальных детализированных моделей нижнего уровня служат исходными данными для синтезирующей обобщенной модели верхнего уровня;
- проведение расчетов по построенной системе моделей на реальных данных с получением практических рекомендаций по выбору наиболее предпочтительных видов и моделей кранов.

Модель может быть использована для экономической оценки, оптимизации приведенных выше технологических и конструктивных параметров, грузопотоков по отдельным портам, причалам, стивидорным компаниям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пустовая Н.В. Состояние и пути обновления парка кранов в морских портах Украины // *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті: Зб. наук. праць.* – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 15. – С. 73-81.
2. Малаксіано М.О. Напрямки переозброєння парку підйомно-транспортного обладнання вітчизняного порту // *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті: Зб. наук. праць.* – Одеса: ОНМУ, 2004. – Вип. 17. – С. 159-173.
3. Марченко В.Г., Пустовой В.Н. Обновление парка портовых кранов морских портов // *Порты Украины.* – 2004. – № 6 (50). – С. 20-23.
4. Пустовой В.Н. Портовые краны: у критической черты // *Порты Украины.* – 2005. – № 5 (55). – С. 38-42.

5. Андриенко А.О. Состояние и перспективные направления обновления парка портовых кранов в морских портах Украины // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Вип. 20. – Одеса: ОНМУ, 2006. – 195 с.
6. Малаксиано А.А. Обоснование выбора критерия оптимальности структуры парка перегрузочного оборудования порта // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 5. – С. 148-156.
7. Малаксиано А.А. Выбор стратегии развития парка перегрузочного оборудования порта в условиях неопределенности // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 6. – С. 145-159.
8. Пустовая Н.В. Оптимизация моментов времени проведения модернизации и замены порталных кранов // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 5. – С. 88-99.
9. Пустовая Н.В. Системная оптимизация стратегии развития парка порталных кранов морских портов // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2004. – Вип. 7. – С. 128-136.
10. Пустовая Н.В. Зависимость оптимальной стратегии обновления порталных кранов от горизонта планирования // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2004. – Вип. 8. – С. 83-95.

Надійшла 18.02.08

УДК 629.123.42-114
338.26:656.61

С.Н. Бондаренко

ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ПОРТОВ (МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ)

Приводится постановка задачи оптимального планирования портового производства с выделением процесса обслуживания судов как его принципиальной основы. Впервые предложена экономико-математическая модель, охватывающая все структурные элементы портового производства, включая процессы грузоперевалки и обслуживания судов. Обсуждаются вопросы реализации модели.

***Ключевые слова:** производственный процесс порта (ППП), процессы грузоперевалки и обслуживания судов, концепция целостности систем, эффект эмерджентности – синергизма в приложении к ППП, многоиндексная модель ППП.*

Обсуждаемая в данной статье проблема стала объектом повышенного внимания специалистов в области обеспечения эффективного функционирования морских портов достаточно давно – еще в 20-е годы минувшего столетия. Ее изучение осуществлялось в нашей стране и в России параллельно с разработкой теории и методов внутрипортового оперативного управления (ВОУ) в составе комплексного учения об организации работы и развития портов, получившего изначальное название «Эксплуатация портов» (в конце 1930-х годов), а затем «Управление портами» (в 1970-х годах) и «Портовый менеджмент» (в середине 1990-х годов).

В настоящее время все три названия сосуществуют и используются как однопорядковые понятия. При этом доминирующим среди них является второе название – «Управление портами».

В истории развития ВОУ можно выделить, как показано в [1], пять пересекающихся этапов, каждый из которых отличается нацеленностью на решение определенных проблем, обычно возникающих при формировании любой прикладной науки.

Первые два этапа – зарождения и становления – пришлось на период от начала 1920-х до середины 1930-х годов. Их совокупным итогом явилось признание необходимости организации работы портов на

научной основе, систематизация и теоретическое обобщение на фрагментарном уровне накопленных знаний о портовом производстве, обогащение практики ВОУ теоретическими представлениями.

Третий этап – создания основ методологии ВОУ – по времени охватывает период от начала 1930-х до середины 1960-х годов. В этот период завершился процесс становления ВОУ как развитой ветви теории управления морским транспортом с охватом ключевых проблем внутрипортового управления. Важнейшая среди этих проблем состояла в создании системы внутрипортового оперативного планирования и диспетчеризации с постановкой типовых плановых задач и разработке методов их решения.

При этом в основу разрабатываемой системы планирования был положен подход, в соответствии с которым предусматривались последовательное составление планов трех видов:

- дислокационного графика грузовой обработки прибывших в порт судов (с ежедневным наращиванием);
- часового графика загрузки-разгрузки каждого принятого к обработке судна;
- сменно-суточного плана работы порта.

Составление перечисленных видов планов основывалось на решении следующих взаимосвязанных задач: о распределении производственных ресурсов (по их видам) между объектами обработки (принятыми к обработке судами) и об использовании ресурсов (главным образом, технологических линий) на отдельных объектах (судах).

Охарактеризованный подход сохранился на четвертом и пятом этапах развития ВОУ, названных в [1] этапами математизации (1960-1970-е годы) и автоматизации (1970-1980-е годы) внутрипортового управления. На обоих этапах внимание исследователей было сосредоточено на совершенствовании методических основ и технологии реализации ВОУ. При этом в центре внимания находились упомянутые выше задачи и виды оперативных планов в привязке к судовым работам.

Так, для решения задачи о распределении ресурсов между судами были разработаны модели разных типов – статические и динамические, детерминированные и вероятностные, линейные и нелинейные, а для их реализации были использованы предложены методы математического программирования, сетевого планирования и управления, имитационного моделирования, а также эвристические приемы и процедуры. В таком же ключе осуществлялось исследование второй задачи планирования – об использовании ресурсов на судах, для решения которой были предложены линейные, параметрические и сетевые модели.

Технология реализации обеих задач получила основательную проработку в составе проекта первой очереди автоматизированной системы управления портом (АСУ «Порт»). При этом ориентированная на

ЭВМ автоматизированная версия решения задачи о распределении ресурсов была представлена комплексом задач «Оперативный план работы порта в оптимальном режиме» и его модификации «Непрерывный план-график работы порта». Задача об использовании ресурсов нашла воплощение в проекте «Оптимальный технический план-график обработки судна». Оба комплекса задач были внедрены в крупнейших портах нашей страны, России и стран Балтии. Их эксплуатация продолжалась до середины 1980-х годов [1].

Затем наступил следующий этап, но не развития, а стабильного зстоя в эволюции ВОУ, который продолжается до настоящего времени. На протяжении уже более 20 лет появилось всего несколько публикаций по проблемам ВОУ, из которых только две работы [2; 3] заслуживают, на наш взгляд, серьезного внимания. В каждой из этих публикаций рассматриваются проблемы оптимизации оперативного планирования обслуживания судов на основе решения задач распределения и использования портовых ресурсов.

Отметим, что в работе [2] приведен двухуровневый комплекс моделей (распределения – использования ресурсов), компактных по структуре и корректных как в содержательном, так и в формальном смысле. Обе модели являются линейными и поддаются решению симплекс-методом.

В то же время в [3] предложена модель, состоящая из двух блоков и 50-ти соотношений, причем переменные модели (параметры управления) являются неоднородными: одна их часть булевы, другая – целочисленные, третьи – могут быть дробными. Для реализации модели предложен алгоритм, эвристический по сути, имитационный по технологии реализации и неопределенный по эффективности (в силу отсутствия оценки качества гарантируемых решений).

Таким образом по ситуации на текущий момент в качестве отправной позиции можно рассматривать комплекс моделей распределения-использования ресурсов, предложенных в работе [2].

Нами уже обращалось внимание в статье [4] на особенность постановки обсуждаемого вопроса в указанной работе, которая состоит в четкой локализации этапов (и соответственно задач) распределения-использования ресурсов при оперативном планировании обслуживания судов. Между тем, как будет показано ниже, эти задачи (этапы) должны рассматриваться в едином решении, что обуславливается концепцией системной оптимизации функционирования систем [5].

Действительно, при автономном рассмотрении процесса обслуживания судов (ПОС) остается, по сути дела вне поля зрения более общий объект ВОУ – производственный процесс порта (ППП). В итоге могут складываться ситуации, когда одностороннее, локальное улучшение пара-

метров ПОС, как частных характеристик ППП, будет приводить к нарушению гармоничной организации ППП как единой системы.

При этом, следуя идеям [5], будем под единством ППП понимать особое свойство, системное по своей природе, которое этот процесс приобретает при интеграции (сочленении) всех осуществляемых в порту технологических процессов, включая ПОС. В теории систем такое свойство называется эмерджентностью (целостностью). Оно проявляется в возникновении у системы (в данном случае ППП) интегральных качеств, не свойственных ее составным элементам и усиливающих связи между последними. Наличие указанных связей между элементами системы, которые в кибернетике и общей теории систем называются синергитическими, обеспечивает увеличение их общего эффекта до величины большей, чем сумма эффектов этих же элементов, действующих независимо. Такого рода интегральный эффект определяется как синергитический, общесистемный.

Цель настоящей статьи состоит в реализации концепции эмерджентности – синергизма в приложении к ППП как единой системе, что является ключевой предпосылкой системной оптимизации ПОС на основе параллельного решения задач распределения производственных ресурсов (на примере технологических линий) между судами и использования ресурсов в процессе обслуживания судов.

Исходя из принципа обеспечения целостности ППП как совокупности процессов грузоперевалки и обслуживания судов, перейдем к постановке задачи оперативного планирования ППП. При этом будем ориентироваться на условия, характерные для современного этапа функционирования портовой системы Украины с учетом перспектив интеграции нашей страны в ЕС.

Последнее обстоятельство предполагает, в частности, неизбежный переход на общеевропейские и общемировые стандарты в организации управления портами. Для украинских портов исходный среди этих стандартов следует связывать с тем, что в настоящее время морские порты промышленно развитых и динамически развивающихся стран делятся по степени их непосредственного участия в осуществлении ППП на две группы [6]:

- порты, администрация которых непосредственно организует портовое производство (порты-операторы, от английского Operation port);
- порты, администрация которых не занимается реализацией портового производства (порты-землевладельцы, от английского Land port).

Порты первой группы свои производственные ресурсы, включая территорию, используют сами, порты второй группы предоставляют земельные участки в аренду частным стивидорным компаниям.

Выделяют также третью группу портов – поставщиков оборудования (Tool port), которые являются как и порты-землевладельцы арендодателями, но сдают в аренду операторам не земельные участки, а все виды производственных ресурсов – причалы, склады, перегрузочное оборудование и др.

В Украине наблюдается тенденция постепенного перехода от портов-операторов к портам-поставщикам оборудования, причем наиболее четко эта тенденция реализуется в Одесском порту, где успешно оперируют частные стивидорные компании на условиях аренды движимого и недвижимого имущества порта.

Принимая во внимание последний факт, будем рассматривать задачу оперативного планирования ППП в привязке как к порту-оператору так и к портам-поставщикам оборудования, точнее к его арендаторам – стивидорным компаниям. При этом для определенности в обоих случаях будем пользоваться термином «терминал», полагая что последний состоит из двух и более причалов и выступает в качестве «мини-порта».

Предположим, что на терминале осваиваются разнородные грузопотоки, одна часть которых следует в экспорте, а другая часть – в импорте. Перевалка грузов производится по вариантам судно-вагон (обратно), судно-склад (обратно), склад-вагон (обратно) с использованием кордонных и тыловых железнодорожных грузовых фронтов. Каждый грузовой фронт состоит из технологических линий (ТЛ), в состав которых входят перегрузочные машины, средства внутрипортового транспорта и бригады (звенья) докеров.

Загрузка-разгрузка и комплексное обслуживание судов производятся на соответствующих по специализации причалах. При этом количество одновременно обслуживаемых судов соответствует ресурсному потенциалу терминала, а интенсивность их обработки регламентируется валовыми нормами.

Перевалка грузов производится по определенным технологическим схемам, связывающим между собой суда и склады, суда и вагоны, вагоны и склады в качестве конкретных рабочих зон. С экономической точки зрения процесс грузоперевалки характеризуется аккордной ставкой и удельной себестоимостью перегрузочных работ.

Эффективность реализации ППП оценивается сопоставлением доходов и расходов по грузоперевалке и обслуживанию судов, т.е. прибылью, получаемой портом (стивидорной компанией). Однако по грузоперевалке при зафиксированных аккордных ставках доходы являются константой, что исключает использование показателя прибыли в качестве критерия оптимальности. В этом случае речь может идти лишь о минимизации расходов на перегрузочные работы.

В случае обслуживания судов доходы по судовым сборам, тарифам, платам и т.п. по каждому судну также являются константой. В силу этого вариация итогового показателя обработки судов может иметь место лишь при возникновении диспача или демереджа при экономии или перерасходе сталийного времени.

Ограничивающие условия обуславливаются необходимостью соблюдения объемов перевалки грузов в экспорте и импорте, загрузки судов и складов, нормативных сроков обслуживания судов, а также лимитированностью производственных ресурсов порта (стивидорной компании) и наличием граничных условий.

Ориентируясь на структуру многоиндексных моделей линейного программирования, введем обозначения основных параметров и характеристик ППП:

r – шифр груза с указанием грузовладельца, $r \in R$;

I – шифр портового склада, $i \in I$;

j – шифр судна, $j \in J$;

z – шифр железнодорожного грузового фронта, $z \in Z$;

v – шифр технологической схемы, $v \in V$;

τ – шифр рабочей смены, $\tau \in T$;

Q_{jr}^{\exists} – количество груза r в экспорте с погрузкой на судно j
 $(r \in R_j^{\exists}, j \in J)$;

$Q_{i\tau}^{\exists}$ – количество груза r в экспорте, хранящегося на складе i на
 начало смены τ ($r \in R_i^{\exists}, i \in I, \tau \in T$) ;

Q_{jr}^u – количество груза r , прибывшего на судне j ($r \in R_j^u, j \in J$) ;

$Q_{i\tau}^u$ – количество груза r в импорте, подлежащего размещению
 в складе i на начало смены τ ($r \in R_i^u, i \in I, \tau \in T$) ;

Q_{rzt}^u – количество груза r в импорте, подлежащего отгрузке на
 железнодорожном грузовом фронте z к началу смены τ
 $(r \in R_z^u, z \in Z, \tau \in T)$;

Q_{rzt}^{\exists} – количество груза r в экспорте, прибывшего на железнодо-
 рожный грузовой фронт z порта в смену τ ($r \in R_z^{\exists},$
 $z \in Z, \tau \in T$) ;

E_i – емкость склада i ($i \in I$) ;

B_{st} – величина ресурса s в смену t ($s \in S$, $t \in T$);

$A_{ijv\tau}^s, A_{zjv\tau}^s, A_{ziv\tau}^s, A_{jiv\tau}^s, A_{jzv\tau}^s, A_{izv\tau}^s$ – норматив

ресурса s , используемого при перевалке груза по технологической схеме v в смену τ по вариантам склад-судно (ij), вагон-судно (zj), вагон-склад (zi), судно-склад (ji), вагон-судно (zj), склад-вагон (iz);

$t_j^{\exists}, t_j^{\text{И}}$ – момент начала обработки судна соответственно с экспортным и импортным грузом ($j \in J$);

$T_j^{\exists}, T_j^{\text{И}}$ – момент окончания обработки судна соответственно с экспортным и импортным грузом ($j \in J$);

$C_{ijv\tau}, C_{zjv\tau}, C_{ziv\tau}, C_{jiv\tau}, C_{jzv\tau}, C_{izv\tau}$ – стоимость содержания нормативного количества ресурса s , используемого при перевалке груза g по технологической схеме v в смену τ по вариантам соответственно склад-судно (ij), вагон-судно (zj), вагон-склад (zi), судно-склад (ji), вагон-судно (zj), склад-вагон (iz);

$P_{ijv\tau}$ – производительность схемы перевалки грузов между (ij) и (zj) участками при v -варианте ТЛ с грузами g в смену τ ;

$X_{ijv\tau}^{\exists}, X_{zjv\tau}^{\exists}, X_{ziv\tau}^{\exists}, X_{jiv\tau}^{\text{И}}, X_{jzv\tau}^{\text{И}}, X_{izv\tau}^{\text{И}}$ – переменные (параметры управления) модели, означающие время перевалки груза g по технологической схеме v в смену τ по вариантам соответственно склад-судно (ij), вагон-судно (zj), вагон-склад (zi), судно-склад (ji), вагон-судно (zj), склад-вагон (iz).

В принятых обозначениях искомая модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{(ij)v \in V} \sum_{g \in R} \sum_{t \in T} c_{ijv\tau}^{tcj} \cdot X_{ijv\tau}^{\exists} + \sum_{(zj)v \in V} \sum_{g \in R} \sum_{t \in T} c_{zjv\tau}^{tcj} \cdot X_{zjv\tau}^{\exists} + \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{g \in R} \sum_{t \in T} c_{jiv\tau} \cdot X_{jiv\tau}^{\text{И}} + \sum_{(jz)v \in V} \sum_{g \in R} \sum_{t \in T} c_{jzv\tau} \cdot X_{jzv\tau}^{\text{И}} + \\ & + \sum_{(iz)v \in V} \sum_{g \in R} \sum_{t \in T} c_{izv\tau} \cdot X_{izv\tau}^{\text{И}} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{V \in V} \sum_{\tau \in T} p_{ijvr} \cdot x_{ijvr}^3 + \sum_{z \in Z} \sum_{V \in V} \sum_{\tau \in T} p_{zjvr} \cdot x_{zjvr}^3 = Q_{jr}^3, \quad j \in J, r \in R_j^3 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{V \in V} p_{ijvr} \cdot x_{ijvr}^3 \leq Q_{irr}^3, \quad j \in I_{\text{скл}}, r \in R_{\text{скл}}^3 \quad (3)$$

$$Q_{ir(\tau-1)}^3 - \sum_{j \in J} \sum_{V \in V} p_{ijvr(\tau-1)} \cdot x_{ijvr(\tau-1)}^3 + \sum_{z \in Z} \sum_{V \in V} p_{zivr(\tau-1)} \cdot x_{zivr(\tau-1)}^3 = Q_{irr}^3 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{V \in V} \sum_{\tau \in T} p_{jivrt} \cdot x_{jivrt}^n + \sum_{j \in J} p_{jzvrt} \cdot x_{jzvrt}^n = Q_{jr}^n, \quad j \in J, r \in R_j^n \quad (5)$$

$$Q_{ir(\tau-1)}^n + \sum_{j \in J} \sum_{V \in V} p_{jivrt(\tau-1)} \cdot x_{jivrt(\tau-1)}^n - \sum_{z \in Z} \sum_{V \in V} p_{izvrt(\tau-1)} \cdot x_{izvrt(\tau-1)}^n = Q_{irr}^n, \quad i \in I, r \in R_i^n \quad (6)$$

$$\sum_{z \in Z} \sum_{V \in V} p_{izvrt} \cdot x_{izvrt}^n = Q_{irr}^n, \quad i \in I, r \in R_i^n, \tau \in T \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{V \in V} p_{jzvrt} \cdot x_{jzvrt}^n + \sum_{i \in I} \sum_{V \in V} p_{izvrt} \cdot x_{izvrt}^n = Q_{zrt}^n, \quad z \in Z, \tau \in T, r \in R_{z\tau} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{V \in V} p_{zjvrt} \cdot x_{zjvrt}^3 + \sum_{i \in I} \sum_{V \in V} p_{zivrt} \cdot x_{zivrt}^3 = Q_{zrt}^3, \quad z \in Z, r \in R_z^3, \tau \in T \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^R Q_{irr}^3 + \sum_{r=1}^R Q_{irr}^n \leq E_{ir}, \quad i \in I \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{(ij)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} a^s_{(ij)v\tau} \cdot x^{\exists}_{(ij)v\tau} + \sum_{(zj)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} a^s_{(zj)v\tau} \cdot x^{\exists}_{(zj)v\tau} + \\
 & + \sum_{(zi)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} a^s_{(zi)v\tau} \cdot x^{\exists}_{(zi)v\tau} + \sum_{(ji)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} a^s_{(ji)v\tau} \cdot x^{\exists}_{(ji)v\tau} + \\
 & + \sum_{(jz)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} a^s_{(jz)v\tau} \cdot x^{\text{И}}_{(jz)v\tau} + \sum_{(iz)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} a^s_{(iz)v\tau} \cdot x^{\text{И}}_{(iz)v\tau} \leq B_{st}, \\
 & s \in S, \tau \in T
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$t^{\exists}_j + \sum_{(ij)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} x^{\exists}_{(ij)v\tau} + \sum_{(zj)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} x^{\exists}_{(zj)v\tau} \leq T^{\exists}_j \tag{12}$$

$$t^{\text{И}}_j + \sum_{(ji)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} x^{\text{И}}_{(ji)v\tau} + \sum_{(jz)v \in V \Gamma \in R} \sum_{\tau \in T} x^{\text{И}}_{(jz)v\tau} \leq T^{\text{И}}_j \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 & t^{\exists}_j = \text{const}; T^{\exists}_j = \text{const}; T^{\text{И}}_j = \text{const}; t^{\text{И}}_j = \text{const}; \\
 & Q^{\exists}_{j\Gamma} = \text{const}; Q^{\text{И}}_{j\Gamma} = \text{const}; Q^{\exists}_{i\Gamma} = \text{const}; Q^{\text{И}}_{i\Gamma} = \text{const}; \\
 & Q^{\exists}_{z\Gamma} = \text{const}; Q^{\text{И}}_{z\Gamma} = \text{const}; B_{st} = \text{const}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 & x^{\exists}_{(ij)v\tau} \geq 0, \quad x^{\exists}_{(zj)v\tau} \geq 0, \quad x^{\text{И}}_{(zi)v\tau} \geq 0, \quad x^{\text{И}}_{(ji)v\tau} \geq 0, \\
 & x^{\text{И}}_{(jz)v\tau} \geq 0, \quad x^{\text{И}}_{(iz)v\tau} \geq 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

Соотношения приведенной модели имеют следующий содержательный смысл:

- (1) – целевая функция, предусматривающая минимизацию эксплуатационных (текущих) расходов порта (компании) на осуществление грузоперевалочного процесса;
- (2) – условие обеспечения плановой загрузки судов экспортным грузом;
- (3) – ограничение на количество экспортных грузов по складам и сменам;
- (4) – уравнение «движения» в порту экспортных грузов;
- (5) – условие обеспечения плановой загрузки судов с импортными грузами;
- (6) – уравнение движения в порту импортных грузов;
- (7) – ограничение на количество импортных грузов по складам и сменам;
- (8),(9) – ограничения по железнодорожным грузовым фронтам и

- сменам на количество импортных грузов, соответственно прибывающих в порт и отправляемых из порта;
- (10) – ограничение на использование емкости складов по сменам при перевалке экспортных и импортных грузов;
 - (11) – ограничение на использование производственных ресурсов по сменам;
 - (12), (13) – ограничение на время обслуживания судов соответственно с экспортными и импортными грузами;
 - (14) – граничные условия;
 - (15) – условие неотрицательности переменных, что вытекает из их экономического смысла.

ВЫВОДЫ

Охарактеризованная выше модель (1)-(15) имеет, как и большинство моделей, отражающих реальные производственные процессы, свои достоинства и недостатки. В дополнение к отмеченным уже достоинствам модели отметим, что ее решением является оптимальный план $\left\{ X_{ijv\tau}^0 \right\}$, который в сочетании с матрицей ресурсных нормативов определяет наиболее выгоднейший в смысле минимума (1) план распределения ресурсов между судами. При этом, если множество судов заменить на множество их грузовых люков с сохранением индексации величин, в том числе люков ($j \in J$), то план $\left\{ X_{ijv\tau}^0 \right\}$ обеспечит одновременное решение задач распределения – использования ресурсов.

Основной недостаток модели (1)-(15) обуславливается ее большой размерностью и адекватной трудоемкостью подготовки исходной информации, используемой при планировании ППП и ПОС. Смягчение (в идеале устранение) негативных последствий проявления этих факторов является основной проблемой дальнейшего совершенствования методики оптимального оперативного планирования ППП с одновременным (параллельным) решением задач распределения – использования портовых производственных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магамадов А.Р. *Оптимизация оперативного планирования работы порта.* – М.: Транспорт, 1979. – 184 с.
2. Магамадов А.Р. *Система оптимального внутрипортового оперативного планирования (концепция ОИИМФ – ОНМУ) // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2005. Вип. 17. – С. 236-248.*
3. Степанец А.В. *Оптимальное оперативное управление работой морского порта.* – Владивосток: «ИНТЕРМОР», 1997. – 188 с.
4. Бондаренко С.Н. *Математические аспекты задачи оперативного планирования обслуживания судов // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2007, Вип. 23. – С. 23-33.*
5. Абрамова Н.Т. *Целостность и управление.* – М.: Наука, 1974. – 248 с.
6. Скворцов Г., Чекаловец В., Крыжановский С. *Реструктуризация управления морскими торговыми портами Украины // Судходство. – 2007. – № 9. – С. 53-55.*

Надійшла 10.03.08

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Предлагается подход к моделированию мультимодальных систем доставки груза с несколькими перевалками по прямому варианту с учетом случайных колебаний продолжительностей рейсов транспортных средств и их грузоподъемностей. Метод исследования основан на теории массового обслуживания и теории марковских процессов.

Ключевые слова: мультимодальная система доставки груза, транспортные средства, прямой вариант перегрузки, неравномерность работы транспорта.

Широкое распространение мультимодальных систем доставки грузов в последние два-три десятилетия ставит перед учеными-транспортниками и проектировщиками транспортных систем ряд новых теоретических и практических задач, решение которых невозможно без использования современных информационных технологий и методов исследования операций. Сложность построения и анализа соответствующих математических моделей вызвана рядом объективных причин, среди которых основными являются:

- высокая комбинаторность, вызванная детальным описанием множества всех возможных состояний (производственных и технических) как отдельных транспортных средств (ТС) разных видов транспорта, так и путевого хозяйства, водных коммуникаций и пунктов перевалки грузов;
- необходимость учета динамического характера работы мультимодальной системы;
- факторы неопределенности и риска, сопутствующие процессам движения ТС и перемещения груза;
- необходимость использования больших объемов исходной информации, касающейся текущего технического состояния ТС, их месторасположения, конъюнктуры рынка транспортных услуг, поведения конкурентов и др.

Простейшие математические модели мультимодальных систем были разработаны в работах [1-3], в которых существенно использовались методы геометрического программирования.

Однако соответствующие модели, ориентированные главным образом на оптимизацию параметров ТС, носят статический характер (некоторым исключением является работа [1], в которой моделируется процесс доставки груза на фиксированном интервале времени).

Ряд простейших динамических моделей с учетом фактора неопределенности приведен в книге [4], где для моделирования широко использовались методы теории массового обслуживания и теории запасов. В цитированной работе детально анализировались в основном двухмодальные системы и там же отмечено, что переход к изучению систем, в которых предусматривается более одной перевалки груза, сопряжен со значительными аналитическими трудностями.

В данной работе предлагается подход к построению и анализу мультимодальной системы доставки груза, в которой предполагается перевалка груза с одного вида транспорта на другой только по прямому варианту. Этот подход основан на применении теории массового обслуживания, согласно которой каждый пункт перевалки (порт) рассматривается как одноканальная обслуживающая система, а между любыми двумя перевалочными пунктами перевозку груза осуществляет только одно ТС. Эффективность работы такого рода транспортно-логистической цепи зависит только от согласованности между собой графиков движения ТС, взаимодействующих в каждом перевалочном пункте, а также от грузоподъемностей этих ТС.

Опишем на формальном языке изучаемую мультимодальную систему. Пусть требуется доставить груз из пункта A в пункт B через последовательность перевалочных пунктов C_1, C_2, \dots, C_n . Из пункта A в первый пункт перевалки C_1 груз доставляется единственным ТС грузоподъемности u_1 , причем время его кругового рейса (т.е. времени с момента ухода порожнего ТС из пункта C_1 до следующего момента его прибытия в пункт C_1 с грузом) есть T_1 . В пункте C_1 груз из ТС выгружается по прямому варианту на ТС другого вида транспорта (или другого типа ТС того же вида транспорта) с интенсивностью V_1 .

Из пункта перевалки C_{k-1} груз перевозится соответствующим единственным ТС грузоподъемности u_k в пункт C_k , где перегружается по прямому варианту на другое ТС с интенсивностью V_y . Время перехода этого ТС по схеме $C_{k-1} \rightarrow C_k$ обозначим через $T_k^{(1)}$, а по схеме $C_k \rightarrow C_{k-1}$ — через $T_k^{(2)}$. Наконец, из последнего пункта перевалки C_n груз вывозится в конечный пункт назначения B с помощью соответствующего ТС, время кругового рейса которого есть T_{n+1} (рис. 1). Таким образом, в описанной мультимодальной схеме доставки груза задействовано $n + 1$ ТС.

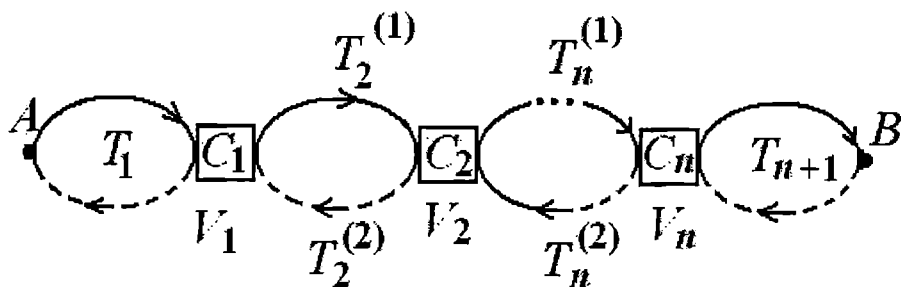


Рис. 1. Схема мультимодальной системы доставки груза с $(n+1)$ -й перевалкой груза

На практике величины γ_k , $k = 1, 2, \dots, n+1$; T_1 , $T_k^{(1)}$, T_{n+1} , $k = 2, 3, \dots, n$, испытывают некоторые случайные колебания, вызванные колебаниями эксплуатационной скорости ТС, их заменой, погодными условиями и т.д. поэтому будем их считать взаимно независимыми случайными величинами с заданными функциями распределения (ФР)

$$G_k(x) = P\{\gamma_k \leq x\},$$

$$A_1(t) = P\{T_1 \leq t\}, \quad A_{n+1}(t) = P\{T_{n+1} \leq t\},$$

$$A_k^{(1)}(t) = P\{T_k^{(1)} \leq t\}, \quad A_k^{(2)}(t) = P\{T_k^{(2)} \leq t\},$$

$$k = 1, 2, \dots, n.$$

Указанные ФР могут быть найдены путем обработки соответствующих статистических данных, собранных за прошлый период. В частности, некоторые из перечисленных величин могут быть постоянными.

Состояние описанной мультимодальной системы в произвольный момент времени t будем описывать случайным вектором с целочисленными компонентами

$$v(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_{n+1}(t)),$$

где $v_1(t) = 1$, если ТС с грузом под выгрузкой находится в n . C_1 ,

$v_1(t) = 2$, если оно находится вне n . C_1 в момент t ;

$v_k(t) = 1$, если ТС находится в момент t под погрузкой в n . C_{k-1} ;

$C_{k-1}, v_k(t) = 2$, если ТС с грузом движется по схеме

$C_{k-1} \rightarrow C_k$ в момент t ;

$v_k(t) = 3$, если ТС находится в момент t под погрузкой в n . C_k ;

$v_k(t) = 4$, если в момент t порожнее ТС движется по схеме
 $C_k \rightarrow C_{k-1}$, $k = 2, 3, \dots, n$;

$v_{n+1}(t) = 1$, если ТС с грузом находится под выгрузкой в n . C_k ,
 $v_{n+1}(t) = 2$, если оно находится вне n . C_n .

Случайный процесс $\vec{v}(t)$ при произвольных законах распределения случайных величин y_k , T_1 , $T_k^{(1)}$, $T_k^{(2)}$ не является марковским. Таковым он становится только в случае, когда все указанные случайные величины подчиняются показательному закону распределения. При этом для нахождения вероятностей различных состояний мультимодальной системы можно вывести и решить соответствующую систему прямых уравнений Колмогорова. Знание указанных вероятностей позволяет рассчитать основные эксплуатационные и экономические показатели, характеризующие эффективность работы мультимодальной системы.

Для случая $n=1$ (одна перевалка) при произвольных ФР $G_1(x)$, $G_2(x)$, $A_1(t)$, $A_2(t)$ стационарные (или предельные при $t \rightarrow \infty$) вероятности вектора $\vec{v}(t)$ были найдены в [4]. При $n > 1$ эта задача значительно усложняется.

Рассмотрим более подробно случай $n = 2$ и показательных законов распределения соответствующих случайных величин. Кодировка возможных состояний такой трехмодальной системы приведена в таблице. Будем решать задачу нахождения предельных вероятностей случайного вектора

$$\vec{v}(t) = (v_1(t), v_2(t), v_3(t)),$$

где компоненты $v_1(t)$, $v_3(t)$ принимают значения 1 или 2, а компонента $v_2(t)$ – значения 1, 2, 3, 4 (табл.).

Таким образом, фазовое пространство состояний изучаемого марковского процесса $v(t)$ имеет вид

$$\Omega = \{(k_1, k_2, k_3) : k_1 = 1, 2; k_2 = 1, 2, 3, 4; k_3 = 1, 2\}.$$

Кодировка возможных состояний трехмодальной системы

Порядковый номер звена трехмодальной системы	Текущее состояние ТС на данном звене системы	Индекс состояния
1	Стоянка в п. C_1	1
	Нахождение вне п. C_1	2
2	Стоянка в п. C_1	1
	Переход по схеме $C_1 \rightarrow C_2$	2
	Стоянка в п. C_2	3
	Переход по схеме $C_2 \rightarrow C_1$	4
3	Стоянка в п. C_2	1
	Нахождение вне п. C_2	2

Однако все 16 возможных состояний не образуют один класс существенных состояний. Это означает, что с течением времени, при $t \rightarrow \infty$, вероятности некоторых из состояний будут равны нулю. С «физической» точки зрения это вызвано тем, что вероятность одновременного окончания обработки (т.е. погрузки-выгрузки) двух ТС, принадлежащим смежным видам транспорта, считается равной нулю (т.е. мы ею пренебрегаем). Действительно, вероятность того, что значения непрерывных случайных величин

$$\frac{\gamma_1}{V_1}, \frac{\gamma_2}{V_1}, \frac{\gamma_2}{V_2}, \frac{\gamma_3}{V_2}$$

будут кратны друг другу, равна нулю (при условии, что $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ распределены экспоненциально).

Поэтому при $t \rightarrow \infty$ соответствующие состояния марковского процесса окажутся невозможными. В этих состояниях процесс $\bar{v}(t)$ может находиться только в начальный момент времени и какой-то случайный промежуток времени до момента первого выхода из них.

Нетрудно убедиться с помощью таблицы, что в пределе при $t \rightarrow \infty$ процесс $v(t)$ может находиться только в следующем подмножестве (существенных) состояний:

$$\Omega_1 = \{(2,1,1), (1,1,1), (1,3,1), (1,3,2), (1,2,1), (1,4,1)\}.$$

Предельные вероятности этих состояний удовлетворяют следующей системе алгебраических уравнений Колмогорова:

$$\begin{aligned}
 (\lambda_1^{(1)} + \lambda_1^{(2)})p(1,1,1) &= \lambda_2^{(1)}p(2,1,1) + \lambda_4^{(2)}p(1,4,1), \\
 \lambda_2^{(2)}p(1,2,1) &= \lambda_1^{(2)}p(1,1,1), \\
 \lambda_2^{(1)}p(2,1,1) &= \lambda_1^{(1)}p(1,1,1), \\
 (\lambda_3^{(2)} + \lambda_1^{(3)})p(1,3,1) &= \lambda_2^{(2)}p(1,2,1) + \lambda_2^{(3)}p(1,3,2), \\
 \lambda_2^{(3)}p(1,3,2) &= \lambda_1^{(3)}p(1,3,1), \\
 \lambda_4^{(2)}p(1,4,1) &= \lambda_3^{(2)}p(1,3,1),
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\sum_{(k_1, k_2, k_3) \in \Omega_1} p(k_1, k_2, k_3) = 1, \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned}
 \lambda_1^{(1)} &= \frac{V_1}{M\gamma_1}, & \lambda_2^{(1)} &= \frac{1}{MT_1}, \\
 \lambda_1^{(2)} &= \frac{V_1}{M\gamma_2}, & \lambda_2^{(2)} &= \frac{1}{MT_2^{(1)}}, & \lambda_3^{(2)} &= \frac{V_2}{M\gamma_2}, & \lambda_4^{(2)} &= \frac{1}{MT_2^{(2)}}, \\
 \lambda_1^{(3)} &= \frac{V_2}{M\gamma_3}, & \lambda_2^{(3)} &= \frac{1}{MT_3};
 \end{aligned}$$

M – символ математического ожидания.

Из уравнений (1) легко находим

$$\begin{aligned}
 p(1,2,1) &= \frac{\lambda_1^{(2)}}{\lambda_2^{(2)}}p(1,1,1), & p(2,1,1) &= \frac{\lambda_1^{(1)}}{\lambda_2^{(1)}}p(1,1,1), \\
 p(1,3,1) &= \frac{\lambda_1^{(2)}}{\lambda_3^{(2)}}p(1,1,1), & p(1,3,2) &= \frac{\lambda_1^{(3)}\lambda_1^{(2)}}{\lambda_2^{(3)}\lambda_3^{(2)}}p(1,1,1), \\
 p(1,4,1) &= \frac{\lambda_1^{(2)}}{\lambda_4^{(2)}}p(1,1,1).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Вероятность $p(1,1,1)$ определяется из условия нормировки (2)

$$p(1,1,1) = \left[1 + \frac{\lambda_1^{(2)}}{\lambda_2^{(2)}} + \frac{\lambda_1^{(1)}}{\lambda_2^{(1)}} + \frac{\lambda_1^{(2)}}{\lambda_3^{(2)}} + \frac{\lambda_1^{(2)}}{\lambda_4^{(2)}} + \frac{\lambda_1^{(3)}\lambda_1^{(2)}}{\lambda_2^{(3)}\lambda_3^{(2)}} \right]^{-1} \quad (4)$$

С точки зрения согласованности работы разных ТС наибольший интерес представляет вероятность взаимного ожидания ТС в перевалочных пунктах.

Для ТС, работающей на первом звене мультимодальной системы, эта вероятность равна

$$p(1,2,1) + p(1,3,1) + p(1,3,2),$$

для ТС, работающей на втором звене,

$$p(2,1,1) + p(2,1,2) + p(1,3,2),$$

а для ТС, работающей на третьем звене –

$$p(1,1,1) + p(2,1,1) + p(1,2,1) + p(1,4,1).$$

Согласно эргодическому свойству марковских процессов [5] перечисленные вероятности могут быть проинтерпретированы как доля времени в эксплуатационном периоде, в течение которого соответствующее ТС простаивает в ожидании ТС смежного вида транспорта.

Более глубокий анализ процесса взаимодействия ТС различных видов транспорта в рамках рассматриваемой мультимодальной системы может быть проведен в предположении, что ФР $A_i(t)$, $A_{n+1}(t)$, $A_k^{(1)}(t)$, $A_k^{(2)}(t)$, $k = 2, 3, \dots, n$, есть распределения Эрланга достаточно высокого порядка, обеспечивающего «почти регулярность» движения ТС на своих участках системы. Использование метода фаз Эрланга позволяет свести анализ такой системы к анализу некоторого марковского процесса с конечным множеством состояний, более общего, чем изученный выше процесс $\vec{v}(t)$.

Еще одним направлением дальнейших исследований является анализ взаимодействия ТС по складскому варианту в рамках мультимодальной цепи с помощью методов, разработанных в монографии [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Курлянд А.М., Постан М.Я., Сторожев В.В. Об одной задаче оптимизации параметров транспортных средств в мульти-модальных системах доставки груза // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2005. – № 16. – С. 56-65.
2. 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: ОНМУ, 2006. – Вип. 11. – С. 168-174.
3. Сторожев В.В. Метод оптимизации параметров транспортных средств в двухмодальной системе доставки груза // Управління проектами та розвиток виробництва. – Зб. наук. праць. – Луганськ, 2008. – № 2. – С. 17-23.
4. Постан М.Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.
5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей / Пер. с англ. Т. 2. – М.: Мир, 1984.

Надійшла 29.02.08

УДК 656.61.052

А.С. Мальцев
В.В. Голиков
Д.С. Жуков

ОБОБЩЕННЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СОГЛАСОВАННОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

На основании системного анализа причин отказов системы управления с использованием естественного интеллекта установлено, что их причиной является отсутствие согласования характеристик технологического процесса и психофизиологических параметров человека оператора, управляющего процессом, а также факторов технологического процесса, постоянных и переменных ограничений.

Предложена методика оценки согласованности факторов процесса и характеристик оператора. Рассмотрены необходимые и достаточные условия обеспечения гарантированной безопасности и концепция построения соответствующей системы управления технологическим процессом.

Ключевые слова: система управления, матрица согласованности, гарантированная безопасность процесса.

Управление любым технологическим процессом связано с риском появления ошибки оператора, в результате которой возникает аварийное происшествие. При оценке причин аварии для описания используют понятие «человеческий фактор», которое, характеризуя проблему в целом, не дает возможности установить конкретную причину и принять адекватные меры для устранения подобных происшествий в будущем.

Эффективность процесса управления определяется возможностью человека-оператора (ЧО) осуществлять правильный прогноз внешних и внутренних возмущений; планировать заданный алгоритм управления; своевременно выявлять отклонения параметров состояния системы от заданных; обеспечить минимальные отклонения их значений при управлении за счет применения управляющих воздействий.

Обычно при предварительном планировании процесса управления ЧО не испытывает ограничений во времени. По этой причине заданный алгоритм управления определяется точностью используемых данных и методами учета всех факторов влияющих на работу системы управления.

Однако в процессе управления изменяются характеристики внеш-

них воздействий и возмущений и в связи с этим ЧО приходится производить коррекцию заданного алгоритма управления.

Времени на выполнение процедур перепланировки у него недостаточно и поэтому приходится принимать решения на основании недостаточной или неполной информации.

При существенных отклонениях параметров управляемого процесса от заданных происходит увеличение общей продолжительности процедур, что значительно усложняет процесс управления и может привести к чрезмерному запаздыванию в принятии решения. Именно при таких условиях, на наш взгляд, чаще всего возникают предпосылки возникновения аварийных ситуаций.

Управление, которое осуществляет ЧО любым технологическим процессом, является эргодическим. Часть функций ЧО выполняет вручную, автоматизированы только отдельные операции по обработке информации и управлению. Поэтому ЧО непосредственно управляет процессом на основе взаимодействия с его информационной моделью, что вызывает усиление требований к уровню психофизиологической подготовки операторов. Параметры операторской деятельности, которые формируют процесс приема, переработки и передачи информации, отражают характеристики анализаторов памяти, мышления, антропометрию, скорость реакций и надежность выполнения управленческих функций [1].

Каждая из указанных характеристик, в конечном счете, влияет на безопасность управления процессом, которая оценивается интегральным показателем – уровнем отказов (аварийности).

Общеметодологическим приемом, который позволяет определить пути решения проблемы обеспечения безаварийного управления технологическим процессом, является системный анализ. Он требует выяснения причин аварийных отказов и использования быстродействующих алгоритмов и кибернетической техники при построении систем управления [2-4].

Публикуемые статистические данные по отказам системы управления позволяют определить только макропараметры, которые характеризуют обобщенные тенденции аварийности и не позволяют установить конкретный характер действий операторов, приведших к происшествиям [5-6]. Для этого требуется анализ детального описания аварий, который обычно содержится только в материалах расследования компетентными органами и заключениях экспертов при судебном разбирательстве.

Приведем возможные причины происшествий на примере системного анализа навигационной аварийности. На основании системного анализа причин навигационных происшествий в БДЛК и ХМК за последние 25 лет установлено [7], что их причиной является отсутствие согласования характеристик процесса маневрирования и психофизиологических параметров человека-оператора, управляющего процессом движения, а также факторов движения, постоянных и переменных ограничений. В этой рабо-

те предложена методика оценки согласованности факторов движения и характеристик оператора. Однако полученные результаты имеют ограниченное применение, поскольку они разработаны только для процесса управления маневрированием судна. Кроме того, недостаточно четко изложена методика получения коэффициентов ранжирования. Проверка их применения показывает, что, получая глобальный коэффициент равным 1, вес коэффициентов ранжирования отдельных психофизиологических характеристик оператора следует уточнять.

Целью настоящего исследования является разработка концепции обеспечения гарантированного безопасного управления любым технологическим процессом за счет совершенствования операторской деятельности ЧО, путем улучшения согласования его характеристик, факторов процесса с жесткими и переменными ограничениями, алгоритмизацию его интеллектуальной работы при принятии решений по корректировке заданного алгоритма управления.

По существу требуется разработка стратегии, тактики и оперативного управления технологическим процессом, которые отвечают современному уровню знаний, для формирования принципов построения алгоритмов операторской деятельности и обоснования мер для создания концепции гарантированной безопасности управления.

Решение поставленных задач требует разъяснения ряда понятий. Так стратегия управления – это совокупность возможных действий для достижения поставленной цели с применением имеющихся ресурсов информационного обеспечения, которые в состоянии реализовать оператор. Иначе говоря, это формирование гипотезы решения задачи. Тактика управления предусматривает декомпозицию каждой гипотезы, что позволяет перейти от исходных к элементарным задачам и произвести их типизацию.

Оперативное управление процессом требует разработки прогноза и плана его выполнения, который заключается в поиске соответствия между исходными данными и необходимыми средствами для достижения поставленной цели.

В результате решения стратегических и тактических задач, а также после разработки технологии управления определяется заданный алгоритм функционирования процесса. При этом на этапе решения стратегических и тактических задач управления детальные характеристики процесса практически не присутствуют, поэтому такие задачи можно считать типовыми. В них учитываются только жесткие ограничения и характеристики элементов системы. При переходе к технологическим процессам и декомпозиции исходных задач на элементарные возникает необходимость учета характеристик процесса для детального планирования управления.

Гарантированная безопасность выполнения технологических задач достигается при выполнении необходимого и достаточного условий

построения процесса управления. Необходимым условием является согласование факторов технологического процесса с психофизиологическими характеристиками оператора, который им управляет. Достаточным условием является определение факторов процесса, соответствующих известным постоянным и изменяющимся переменным ограничениям.

Пути достижения указанных целей следует обосновать на основе анализа материалов детального расследования аварийных происшествий и судебных экспертиз.

Для получения содержательной модели оценки соответствия факторов технологического процесса существующим ограничениям на его параметры необходимо описать множества:

- возможных альтернатив по каждому фактору, в результате чего получается пространство стратегий $\Pi_{ст}, \Pi_{ст} \in \Pi_{ст}$;
- возможных значений воздействий неконтролируемых факторов и получить пространство неконтролируемых факторов $Z_{нк}, z_{нк} \in Z_{нк}$, которые не изменяют планового режима движения;
- случайных переменных возмущений $Z_{пв}, z_{пв} \in Z_{пв}$ которые носят информационный характер, вынуждая изменять плановые показатели.

В связи с этим критерий безопасности выполнения операции управления $\sigma_{эм}$ является числовой характеристикой и представляет собой функцию по крайней мере трех переменных $\sigma_{эм}(n_{ст}, z_{нк}, z_{пв})$. Она определена декартовым произведением множества $\Pi_{ст} \cdot Z_{нк} \cdot Z_{пв}$. Значение $\sigma_{эм}$ на паре $(n_{ст}, z_{нк})$ характеризует качество стратегии $n_{ст}$ при значениях неконтролируемых факторов $z_{нк}$. Если неконтролируемые факторы фиксированы, то множества $Z_{нк}$ и $Z_{пв}$ состоят из одного элемента и задача решается методами теории оптимизации.

Главная задача исследования технологического процесса заключается в сравнении различных альтернатив и выборе наилучшей из них, которая по своим характеристикам наиболее близка к оптимальной. Для этого обычно используются численные оценки альтернатив, которые являются только функциями стратегий $\sigma_{эм}(\Pi_{ст})$, не зависят от внешних воздействий $z_{нк}, z_{нк} \in Z_{нк}$ и возмущений $z_{пв}, z_{пв} \in Z_{пв}$. Среди таких оценок в настоящее время наиболее распространены гарантированные $\underline{\sigma}_{эм}(\Pi_{ст})$ и средние $\bar{\sigma}_{эм}(\Pi_{ст})$ оценки эффективности стратегий. Гарантированная оценка безопасности $\underline{\sigma}_{эм}(\Pi_{ст})$ означает ситуацию, при которой альтернатива рассчитывается для наиболее тяжелых условий течения процесса

$$\underline{\sigma}_{эм}(\Pi_{ст}) = \min_{z_{пв} \in Z_{пв}} \sigma(\Pi_{ст}, z_{пв}) \quad \text{и} \quad \underline{\sigma}_{эм}(\Pi_{ст}) = \min_{z_{нк} \in Z_{нк}} \sigma(\Pi_{ст}, z_{нк}).$$

Средняя оценка безопасности $\bar{\sigma}_{эм}(\Pi_{ст})$ может быть определена путем усреднения критерия эффективности $\sigma_{эм}(\Pi_{ст}, z_{пв}, z_{нк})$ по всем значениям неконтролируемых воздействий $z_{нк}, z_{нк} \in Z_{нк}$ и переменных ограничений $z_{пв}, z_{пв} \in Z_{пв}$. Так как стратегия управления зависит от многих трудно контролируемых факторов, то требуется многокритериальный подход и применение сложных методов теории оптимизации.

Как показывает выполненный анализ аварийности и ошибок в действиях человека-оператора на примере процесса маневрирования, они обусловлены отсутствием достаточного согласования между характеристиками процесса управления и характеристиками деятельности ЧО как элемента системы, а также факторов процесса с переменными и постоянными ограничениями.

Для количественной оценки безопасности управления предполагается введение глобального интегрального многофакторного критерия согласованности психофизиологических характеристик деятельности оператора и факторов технологического процесса. Сложный технологический процесс включает значительное количество факторов, которые его описывают и четыре характеристики оператора как элемента системы управления.

С точки зрения деятельности оператора ошибки возникают в процессе получения зрительной информации из-за необходимости ее обработки. Этот этап сбоев в управлении на примере процесса маневрирования судна характеризуется потерей ориентировки, на долю этой причины приходится 31,8% из 173 принятых к анализу случаев. Для их устранения необходимо обрабатывать информацию и представлять ее оператору в виде процедурных рекомендаций, которые воспринимаются им однозначно.

Если произошло изменение внешних воздействий и переменных ограничений, то оператору требуется осуществлять обработку поступающей декларативной информации по контролю над параметрами процесса управления для корректировки плановой траектории. Этот этап приводит к ошибкам в управлении процессом маневрирования, на долю которых приходится 23,1%. Для повышения безопасности необходимо разрабатывать кибернетическую систему поддержки принятия решения.

Задержки в интеллектуальной деятельности оператора влияют на скорость и надежность принятия решения и контроля над его реализацией. Этот этап приводит к ошибкам в соблюдении правил плавания, на долю которых приходится 17,5% из всех случаев происшествий.

Антропометрические характеристики оператора определяют условия функционирования его физиологических систем.

В качестве точки отсчета при маневрировании принято считать плановые значения факторов процесса, а гарантированный результат достигается при максимально возможном приближении фактических значений параметров к плановым. Таким образом, эффективность управления определяется прогнозируемыми характеристиками технологического процесса и способностью оператора выполнить намеченный план. Для оценки согласованности введем три критерия согласованности факторов процесса управления и характеристик оператора – локальный, обобщенный локальный и глобальный.

Локальные критерии согласованности характеризуют степень согласованности каждой характеристики оператора с соответствующими факторами процесса управления, число которых равно k . Их общее количество равно $4 \cdot k$. Условные обозначения коэффициентов приведены в табл.1.

Таблица 1

Локальные коэффициенты согласованности

Факторы процесса	Анализаторы	Память	Интеллектуальные функции	Антропометрия
1-й фактор	$K_{1фа}$	$K_{1фп}$	$K_{1фн}$	$K_{1фм}$
2-й фактор	$K_{2фа}$	$K_{2фп}$	$K_{2фн}$	$K_{2фм}$
.....
i-й фактор	$K_{iфа}$	$K_{iфп}$	$K_{iфн}$	$K_{iфм}$
.....
k-й фактор	$K_{кфа}$	$K_{кфп}$	$K_{кфн}$	$K_{кфм}$

При согласованности одного фактора движения с одной характеристикой оператора он принимает значение равное, $1/k$, при отсутствии – он равен 0.

Обобщенные локальные критерии согласованности – информационного анализа ($K_{ан}$), памяти и мышления ($K_{пам}$), скорости и надежности выполнения интеллектуальных функций ($K_{фун}$) и антропометрии ($K_{ант}$) характеризуют степень согласованности каждой характеристики оператора со всеми факторами процесса. Каждый из них принимает значения, равные $[0; 1]$. При согласованности одного фактора процесса с соответствующей характеристикой, $K_{ан}, K_{пам}, K_{фун}, K_{ант} = 1/k$ двух – $2/k$, трех – $3/k$, четырех – $4/k$ и 1,0 при полном совпадении.

Глобальный критерий согласованности ($K_{\text{сог}} \in [0; 1 \text{ отн. ед}]$) характеризует степень согласованности всех характеристик деятельности оператора со всеми факторами технологического процесса, представленными в виде отдельных коэффициентов.

Если глобальный и обобщенные локальные критерии равны единице, то это значит, что обеспечивается согласованность составляющих технологического процесса и создаются предпосылки гарантированной безопасности.

При определении значений коэффициентов согласованности необходимо учитывать вероятность происшествя по каждой характеристике путем умножения обобщенных локальных критериев на коэффициент ранжирования. Тогда $K_{\text{сог}}$ будет иметь вид

$$K_{\text{сог}} = \sum_{i=1}^4 \left(K_{\text{рж}i} \cdot \sum_{j=1}^{\kappa} K_{\text{лок}ij} \right), \quad (1)$$

где i – число характеристик оператора ($i \in [1; 4]$); j – число факторов движения $j \in [1; \kappa]$; $K_{\text{рж}}$ – коэффициент ранжирования ошибок оператора; $K_{\text{лок}}$ – локальный коэффициент согласованности (табл.1).

Структурная схема алгоритма определения коэффициента по формуле (1), представленная в виде матрицы согласованности, приведена на рис. 1.

Кроме того, необходимо учитывать не только результаты анализа аварийности, но и результаты изучения психофизиологических характеристик оператора, что требует дополнительных исследований.

Рассмотренные необходимые и достаточные условия позволяют приступить к обоснованию процесса гарантированной безопасности выполнения процесса управления.

Для выполнения технологического процесса маневрирования мерирами для обеспечения гарантированной безопасности будут целенаправленные интеллектуальные действия оператора и на каждом его этапе решается определенный круг задач [8; 9].

Подготовку к маневрированию и его выполнение будем рассматривать состоящими из четырех этапов: планирование процесса перемещения с учетом жестких ограничений и долгосрочного прогноза параметров гидрометеорологических условий плавания; управление процессом движения в соответствии с предварительным планом и его корректировка по фактическим параметрам гидрометеорологических условий плавания; корректировка первоначального плана при появлении переменных ограничений в процессе перемещения; выполнение морских операций на начальных и конечных участках перехода. Особенностью первого этапа является возможность решения задач до начала плавания, остальные могут выполняться только в процессе управления.

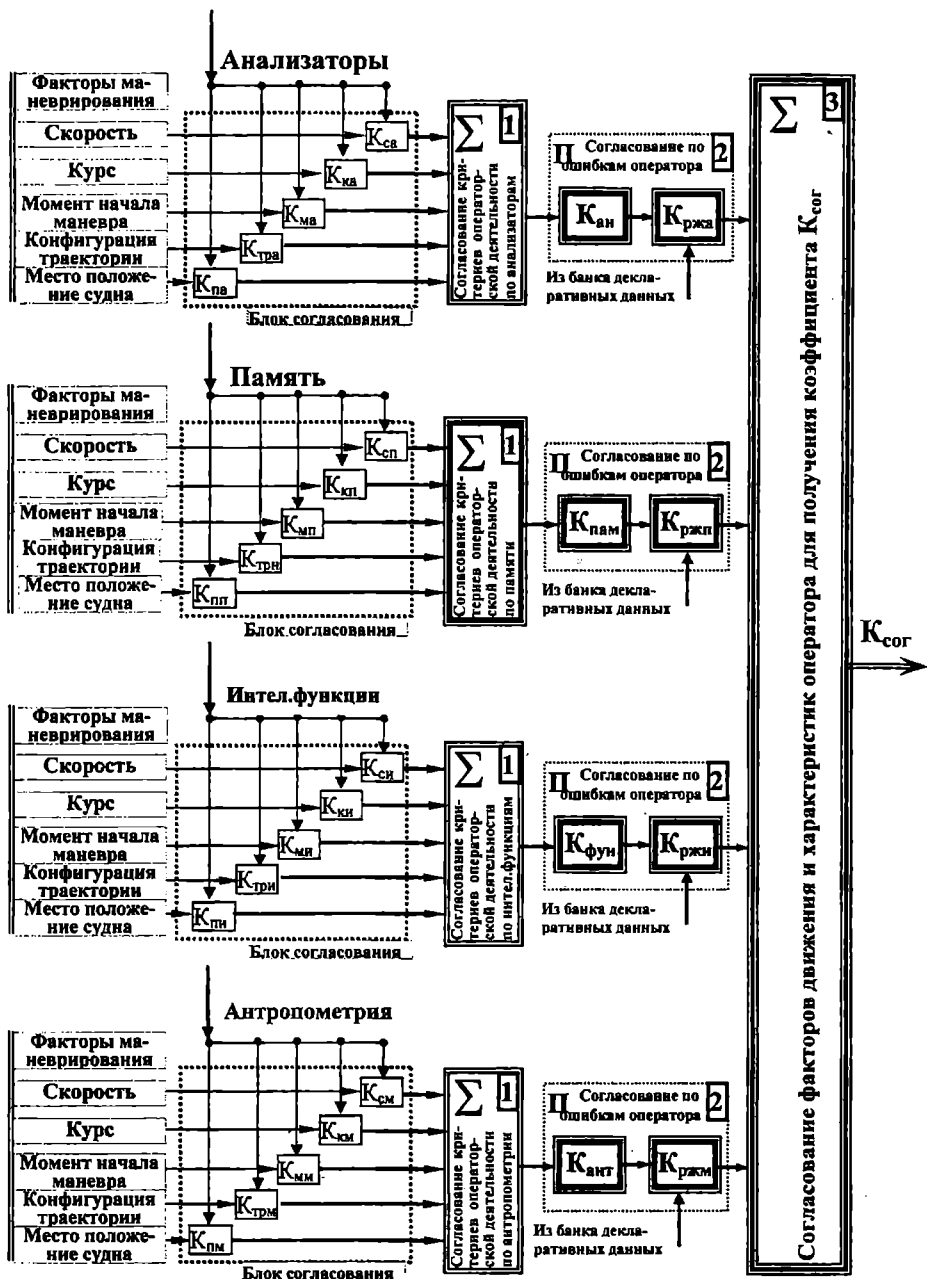


Рис. 1. Структурная схема алгоритма определения коэффициента согласованности. Обозначение блоков:

- 1 – согласование по локальным критериям;
- 2 – согласование с учетом ошибок оператора;
- 3 – глобальное согласование

После того, как предварительный план составлен, можно приступать к выполнению следующей стадии маневрирования – управлению процессом перехода. Для его реализации необходимо:

- осуществить выполнение морской операции по выходу из порта;
- уточнить параметры гидрометеорологических факторов и скорректировать поправки, принятые по прогностическим данным;
- ввести в работу устройство управления курсом (ручное или автоматическое), навигационные устройства по определению места судна, оценке навигационной обстановки и определения момента появления переменных ограничений движению судна. При определении места и наличия отклонения следует уточнить причины, вызвавшие смещение и скорректировать курс без изменения первоначального плана с таким расчетом, чтобы судно точно вышло в последующую путевую точку.

При появлении переменных ограничений возрастает объем операторской работы по обработке информации, особенно при плавании в стесненных условиях, при ограниченной видимости и наличии интенсивного судоходства. Это вызывает необходимость наличия другого оператора, который непосредственно не занят управлением, а только обработкой информации и подготовкой данных.

Как следует из анализа аварийности и изучения процессов маневрирования, существующая практика обеспечения безопасности движения обладает целым рядом недостатков:

- отсутствует база декларативных данных о маневренных свойствах;
- недостаточно разработана концепция прогнозирования и планирования заданного алгоритма системы управления, а методика планирования морских операций отсутствует вообще;
- отсутствует систематизированная концепция корректировки движения при переменных ограничениях;
- недостаточное информационное обеспечение о текущих параметрах движения и их соответствии плановым;
- отсутствуют системы поддержки принятия решений.

Таким образом, гарантированную безопасность управления маневрированием предполагается обеспечить за счет повышения уровня информированности и быстродействия систем обработки информации с последующей разработкой алгоритмов операторской деятельности путем:

- структурирования тактических и оперативных задач, разработки алгоритмов интеллектуальных действий оператора при планировании и управлении движением судна;
- разработки алгоритмов и программ расчета прогнозируемой

- безопасной скорости в различных условиях плавания;
- планирования морских операций инверсным методом; создания системы поддержки принятия решений по маневрированию;
- разработки алгоритмов текущего контроля расхождения и способов корректировки первоначально заданной траектории;
- разработки алгоритмов текущего контроля местоположения, включая криволинейное движение, и визуализацию текущей ситуации расхождения с опасно маневрирующими судами.

В теории катастроф рассматривается системный подход к анализу происшествий, согласно которому при правильно организованном детерминированном процессе управления аварии не должны происходить. Методами и способами обеспечения предпосылок организацию безопасного управления технологическим процессом можно обеспечить за счет:

- обеспечения быстрого действия устройств обработки информации;
- использования детерминированных алгоритмов операторской деятельности;
- применения инверсного метода планирования заданного алгоритма управления для достижения поставленной цели;
- обеспечения согласованности характеристик процесса и естественного интеллекта для исключения возникновения аварийных происшествий по причине недостаточности управляющих воздействий для компенсации влияния внешних воздействий и возмущений.

Оценку коэффициентов ранжирования для определения степени согласованности необходимо производить по результатам анализа аварийных происшествий (отказов) в системе по каждой характеристике естественного интеллекта. Такие данные можно получить только в результате создания специальных методик расследования причин отказов и оценки точности их значений.

Выводы и предложения:

1. Предложена концепция гарантированной безопасности управления технологическим процессом, которая основана на системном подходе и базируется на детальном анализе причин происшествий.
2. В процессе алгоритмизации деятельности ЧО на основе критерия согласованности его психофизиологических характеристик и факторов технологического процесса выделены три режима оперативного управления – подготовка, выполнение технологического процесса и операции по запуску технологического цикла и его завершению, которые подверглись предварительным исследованиям на уровнях логистических операций и

блок-схемных решений.

3. Последующие исследования целесообразно направлять на создание структуры системы управления процессом при различных внешних воздействиях и возмущениях, расширение класса решаемых задач и создания условий для обеспечения гарантированной безопасности выполнения, включая совершенствование и исследование гибридных систем и систем искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленин М.П. *Эргономика на морском транспорте*. – Одесса: Банто, 1999. – 382 с.
2. Антонов А.В. *Системный анализ*. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.; Наука, 1978. – 245 с.
3. Герасимов И.Г. *Структура научного исследования*. – М.: Мысль, 1985. – 217 с.
4. Колесников Л.А. *Основы теории системного подхода*. – К.: Наукова думка, 1988. – 171 с.
5. Кейхилл Р.А. *Столкновения судов и их причины*. – М.: Транспорт, 1987. – 248 с.
6. Юдович А.Б. *Предотвращение навигационных аварий морских судов*. 2-е изд., доп. – М.: Транспорт, 1988. – 224 с.
7. Вильский Г.Б., Мальцев А.С., Бездольный В.В., Гончаров Е.И. *Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов*. – Одесса-Николаев: Феникс, 2007. – 456 с.
8. Голиков В.А., Мальцев А.С. *Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА. Вып. 13*. – Одесса: ИздатИнформ, 2007. – С.
9. Мальцев А.С. *Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов // Сб. научн. трудов НАН Украины. Вып.3*. – 2006. – С. 180-197.

Надійшла 05.02. 2008

АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СУДОВОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

В статье представлены результаты синтеза оптимальной системы автоматического управления судовой центральной системой кондиционирования воздуха (СКВ). Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к проектированию и эксплуатации средств автоматизации СКВ.

Ключевые слова: кондиционирование, передаточные функции, алгебраическое уравнение Риккати, оптимальное управление.

Системы кондиционирования воздуха используются для поддержания требуемого микроклимата воздушной среды в кондиционируемых помещениях. Оснащение СКВ системами автоматического управления на основе программируемых устройств позволяет решать задачи как по оптимизации режимов воздухообработки [1; 2], так и по оптимизации самого управления. Однако известные методы регулирования СКВ не рассматривают воздухообработку в кондиционере как единый технологический процесс. Кроме того, ориентация на возможные решения по технологии и управлению ограничивается вариантами, не отвечающими условиям оптимальности. Исходя из этого, возникла необходимость разработать систему управления СКВ, способную решать задачи по оптимизации режимов кондиционирования воздуха. Решение подобной задачи возможно при комплексном исследовании СКВ и системы автоматического управления, на основе которого можно сформулировать обоснованные требования для перспективной разработки унифицированных систем управления для СКВ.

Полученные ранее результаты исследований судовой центральной СКВ, оптимизация ее режимов работы [3] позволили разработать обобщенную математическую модель системы как объекта автоматизации. На рис. 1 и 2 приведены полученные структурные схемы таких моделей для «летнего» и «зимнего» режимов воздухообработки в центральном кондиционере. Структуры моделей и их параметры изменяются в зависимости от параметров наружного воздуха. Передаточные функции отдельных звеньев моделей (технологических элементов центрального кондионера) определяются по результатам исследований [3].

При решении задачи аналитического конструирования системы линейного оптимального управления рассматриваемый управляемый процесс можно описать детерминированным дифференциальным уравнением состояния системы в общем виде

$$x(t) = F[\bar{X}(t), \bar{U}(t)], \quad (1)$$

где $\bar{X}(t)$ – действительный n -мерный вектор-столбец, обозначающий состояние системы в момент времени t ;

$\bar{U}(t)$ – действительный k -мерный вектор-столбец, обозначающий входную переменную, или переменную управления;

F – функция действительная и векторная.

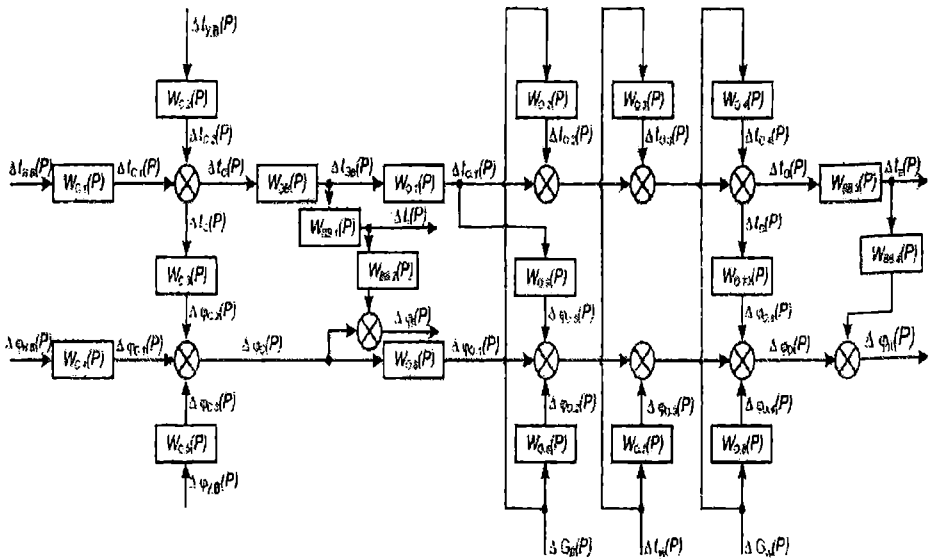


Рис. 1. Структурная схема модели центрального кондиционера в «летнем» режиме работы СКВ

Решение задачи детерминированного линейного оптимального регулирования, как известно [4], позволяет точно рассчитать переходные процессы в том случае, когда линейная система имеет возмущенное начальное состояние и необходимо вернуть систему в нулевое состояние с максимальным быстродействием. Что же касается рассматриваемой СКВ как линейной системы с постоянными параметрами, то она при полной управляемости всегда может быть стабилизирована с помощью закона управления с обратной связью. В каждом установленном режиме работы

СКВ используются управляющие воздействия U_1, \dots, U_R из всего возможного набора управлений для СКВ. Они выбираются либо с помощью вычислительного устройства системы автоматического управления, либо оператором. Рассматривая объект автоматизации (СКВ) как детерминированную линейную непрерывную управляемую динамическую систему, решим линейно-квадратическую классическую задачу аналитического конструирования оптимального регулятора для случая стабилизации состояния системы при отсутствии возмущающих воздействий.

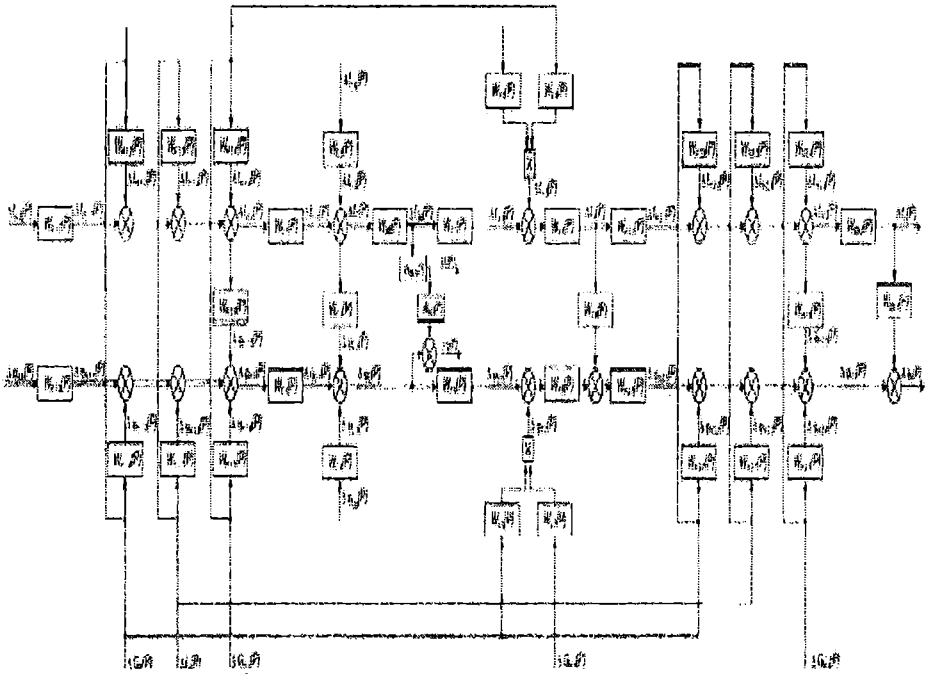


Рис. 2. Структурная схема модели центрального кондиционера в «зимнем» режиме работы СКВ

Таким образом, объект описывается следующим дифференциальным уравнением в материальной форме

$$\dot{x} = A \bar{X}(t) + B \bar{U}(t) \tag{2}$$

при начальных условиях $\bar{X}(t_0) = X_0$, A, B – матрицы постоянных коэффициентов.

Уравнение (2) может быть записано в следующем виде:

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{14} \end{pmatrix} + B \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ U_5 \end{pmatrix}$$

В общем виде матрицы постоянных коэффициентов A и B с учетом того, что исходная система уравнений, описывающих обобщенную математическую модель объекта при круглогодичной работе системы, имеют вид

$$A = \{ a_{ij} \}; B = \{ b_{il} \},$$

где $i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 14; l = 1, \dots, 5$.

Матрицы постоянных коэффициентов для рассматриваемой реальной системы таковы

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{3,1} & a_{3,2} & 0 & 0 & 0 & a_{3,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{4,6} & 0 & 0 & a_{4,9} & a_{4,10} & a_{4,11} & a_{4,12} & a_{4,13} & a_{4,14} & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ b_{2,1} & b_{2,2} & 0 & 0 & 0 \\ b_{3,1} & 0 & b_{3,3} & b_{3,4} & b_{3,5} \\ b_{4,1} & 0 & b_{4,3} & b_{4,4} & b_{4,5} \end{pmatrix}$$

где

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= W_{1,1}(p); a_{1,2} = W_{1,2}(p); a_{1,3} = W_{1,4}(p); a_{2,1} = -W_{2,3}(p); \\ a_{2,2} &= W_{2,9}(p); a_{2,3} = W_{2,11}(p); a_{2,4} = W_{2,6}(p); a_{2,5} = W_{2,7}(p); \\ a_{3,1} &= W_{3,1}(p); a_{3,2} = W_{3,2}(p); a_{3,6} = W_{3,3}(p); a_{4,6} = W_{4,4}(p); \\ a_{4,9} &= W_{4,1}(p); a_{4,10} = W_{4,2}(p); a_{4,11} = W_{4,3}(p); a_{4,12} = W_{4,5}(p) \\ a_{4,13} &= W_{4,6}(p); a_{4,14} = W_{4,7}(p); b_{1,1} = -W_{1,3}(p); b_{1,2} = -W_{1,5}(p) \\ b_{2,1} &= -W_{2,10}(p); b_{2,2} = -W_{2,12}(p); b_{3,1} = W_{3,4}(p); b_{3,3} = W_{3,5}(p) \\ b_{3,4} &= W_{3,6}(p); b_{3,5} = W_{3,7}(p); b_{4,1} = W_{4,8}(p); b_{4,3} = W_{4,9}(p) \\ b_{4,4} &= W_{4,10}(p); b_{4,5} = W_{4,11}(p) \end{aligned}$$

$$W_{1,1}(p) = W_{C,1}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{O,1}(p);$$

$$W_{1,1}(p) = K_{CM,1} \cdot K_{ЭВ} \cdot \frac{k_{0,1}}{T_0 \cdot p + 1};$$

$$W_{1,2}(p) = W_{C,2}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{O,1}(p);$$

$$W_{1,2}(p) = K_{CM,2} \cdot K_{ЭВ} \cdot \frac{k_{0,1}}{T_0 \cdot p + 1};$$

$$W_{1,3}(p) = W_{O,2}(p); \quad W_{1,3}(p) = \frac{k_{0,2}}{T_0 \cdot p + 1};$$

$$W_{1,4}(p) = W_{O,3}(p); \quad W_{1,4}(p) = \frac{k_{0,3}}{T_0 \cdot p + 1};$$

$$W_{1,5}(p) = W_{O,4}(p); \quad W_{1,5}(p) = \frac{k}{T_0 \cdot p + 1};$$

$$W_{2,6}(p) = W_{C,4}(p) \cdot W_{O,5}(p); \quad W_{2,6}(p) = K_{C4} \cdot \frac{k_{d\varphi}}{T'_{3,0} + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p};$$

$$W_{2,7}(p) = W_{C,5}(p) \cdot W_{O,5}(p); \quad W_{2,7}(p) = K_{C5} \cdot \frac{k_{d\varphi}}{T'_{3,0} + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p}$$

$$W_{2,8}(P) = [W_{C,1} \cdot W_{C,3} \cdot W_{O,5}(P) + K_{C,1} \cdot W_{O,9}(P) - W_{C,1} \cdot W_{ЭВ} \cdot W_{O,1}(P) \cdot W_{O,10}(P)];$$

$$\begin{aligned} W_{2,8}(P) = & [K_{C,1} \cdot K_{C,3}] \cdot \frac{k_{d\varphi}}{T'_{3,0} + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot P} + \\ & + K_{C,1} \cdot \frac{k_{0,9}}{T'_{3,0} \cdot P + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot P} \cdot [K_{C,1} \cdot K_{ЭВ}] \cdot \frac{k_{0,1}}{T_0 \cdot P + 1} \times \\ & \times \frac{k_{0,10}}{T'_{3,0} \cdot P + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot P}; \end{aligned}$$

$$W_{2,9}(p) = [W_{C,2}(p) \cdot W_{C,3}(p) \cdot W_{0,5}(p) + W_{C,2}(p) \cdot W_{0,9}(p) + W_{C,2}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{0,9}(p) \cdot W_{0,10}(p)];$$

$$W_{2,9}(p) = [K_{C,2} \cdot K_{C,3} \cdot \frac{k_{d\phi}}{T'_{3,0} + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p} + K_{C,2} \cdot \frac{k_{0,9}}{T'_{3,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p} + [K_{C,2} \cdot K_{ЭВ}] \cdot \frac{k_{0,9}}{T'_{3,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p} \times \frac{k_{0,10}}{T'_{3,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p};$$

$$W_{2,10}(p) = W_{0,2}(p) \cdot W_{0,10}(p) + W_{0,6}(p);$$

$$W_{2,10}(p) = \frac{k_{0,2}}{T_0 \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{0,10}}{T'_{3,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p} + \frac{k_{0,2} \cdot k_{I\phi}}{T'_{1,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p}$$

$$W_{2,11}(p) = W_{0,3}(p) \cdot W_{0,10}(p) - W_{0,7}(p);$$

$$W_{2,11}(p) = \frac{k_{0,3}}{T_0 \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{0,10}}{T'_{3,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p} - \frac{k_{0,3} \cdot k_{I\phi}}{T'_{1,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p};$$

$$W_{2,12}(p) = W_{0,4}(p) \cdot W_{0,10}(p) + W_{I,8}(p); \quad W_{2,12}(p) = \frac{k}{T_0 \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{0,10}}{T'_{3,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p} + \frac{k_{0,4} \cdot k_{I\phi}}{T'_{1,0} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3,0} \cdot p}$$

$$W_{3,1}(p) = W_{H,2,1}(p) \cdot W_{Y,4}(p) \cdot W_{Y,1}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{H,1,1}(p);$$

$$W_{3,1}(p) = \frac{k_{H,2,1}}{T'_{H,2,1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{H,2,1} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{1,Y} \cdot p + 1} \cdot K_I \cdot K_{ЭВ} \cdot \frac{k_{H,1,1}}{T'_{H,1,1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{H,2,1} \cdot p};$$

$$W_{3,2}(p) = W_{H,2,1}(p) \cdot W_{Y,4}(p) \cdot W_{Y,1}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{C,2}(p);$$

$$W_{3.2}(p) = \frac{k_{H2.1}}{T'_{H2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{H2.3} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{1,y} \cdot p + 1} \cdot K_t \cdot K_{ЭВ} \cdot K_{CM2};$$

$$W_{3.3}(p) = W_{H2.1}(p) \cdot W_{y.4}(p) \cdot W_{y.1}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{C.1}(p) \cdot W_{H.1.3}(p) + W_{H2.3}(p);$$

$$W_{3.3}(p) = \frac{k_{H2.1}}{T'_{H2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{H2.3} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{1,y} \cdot p + 1} \cdot K_t \cdot K_{ЭВ} \cdot K_{CM1} \\ \cdot \frac{k_{H1.3}}{T'_{H.1.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3.H} \cdot p} + \frac{k_{H2.3}}{T'_{H2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3.H} \cdot p};$$

$$W_{3.4}(p) = W_{H2.1}(p) \cdot W_{y.4}(p) \cdot W_{y.1}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{C.1}(p) \cdot W_{H.1.2}(p) + W_{H2.2}(p);$$

$$W_{3.4}(p) = \frac{k_{H2.1}}{T'_{H2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{H2.3} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{1,y} \cdot p + 1} \cdot K_t \cdot K_{ЭВ} \cdot K_{CM1} \\ \cdot \frac{k_{H.1.2} \cdot (T_{H.1.2} \cdot p + 1)}{(T'_{H.1.1} \cdot p + 1)} \cdot e^{-T_{3.H} \cdot p} + \\ + \frac{k_{H2.2} \cdot (T_{H.2.2} \cdot p + 1)}{(T'_{H2.1} \cdot p + 1)} \cdot e^{-T_{3.H} \cdot p};$$

$$W_{3.5}(p) = W_{H2.1}(p) \cdot W_{y.4}(p) \cdot W_{y.1}(p) \cdot W_{ЭВ}(p) \cdot W_{C.1}(p) \cdot W_{H.1.4}(p);$$

$$W_{3.5}(p) = \frac{k_{H2.1}}{T'_{H2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{H2.3} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{1,y} \cdot p + 1} \cdot K_t \cdot K_{ЭВ} \cdot K_{CM1} \\ \cdot \frac{k_{H1.4}}{T'_{H.1.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{3.H} \cdot p};$$

$$W_{3.6}(p) = W_{H2.1}(p) \cdot W_{y.4}(p) \cdot W_{y.2}(p) \cdot W_{y.3}(p);$$

$$W_{3.6}(p) = \frac{k_{H2.1}}{T'_{H2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_{H2.3} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{1,y} \cdot p + 1} \cdot k_{G.1} \cdot k_{n.1};$$

$$W_{4.1}(p) = W_{H2.5}(p) \cdot W_{y.9}(p);$$

$$W_{4.1}(p) = \frac{k_{\iota\phi}}{T'_{H2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\iota\phi};$$

$$W_{4.2}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{Y.5}(p) \cdot W_{Y.8}(p) \cdot W_{C.3}(p);$$

$$W_{4.2}(p) = \frac{k_{I\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\varphi} \cdot \frac{1}{T_{2.Y} \cdot p + 1} \cdot K_{CM3};$$

$$W_{4.3}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{Y.5}(p) \cdot W_{Y.8}(p) \cdot W_{C.4}(p) \cdot W_{H.1.9}(p);$$

$$W_{4.3}(p) = \frac{k_{I\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\varphi} \cdot \frac{1}{T_{2.Y} \cdot p + 1} \cdot K_{CM3} \cdot K_{I\varphi};$$

$$W_{4.4}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{Y.5}(p) \cdot W_{Y.8}(p) \cdot W_{C.4}(p) \cdot W_{H.1.7}(p) + W_{H.2.7}(p);$$

$$W_{4.4}(p) = \frac{k_{I\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\varphi} \cdot \frac{1}{T_{2.Y} \cdot p + 1} \cdot K_{CM3} \\ \cdot \frac{k_{H.1.3} \cdot k_{I\varphi}}{T'_{H.1.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot \frac{k_{H.2.3} \cdot k_{I\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p}$$

$$W_{4.5}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{Y.5}(p) \cdot W_{Y.8}(p) \cdot W_{C.6}(p);$$

$$W_{4.5}(p) = \frac{k_{I\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\varphi} \cdot \frac{1}{T_{2.Y} \cdot p + 1} \cdot K_{CM6};$$

$$W_{4.6}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{Y.5}(p) \cdot W_{Y.8}(p) \cdot W_{C.4}(p) \cdot W_{H.1.5}(p);$$

$$W_{4.6}(p) = \frac{k_{I\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\varphi} \cdot \frac{1}{T_{2.Y} \cdot p + 1} \cdot K_{CM4} \\ \cdot \frac{k_{I\varphi}}{T'_{H.1.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p};$$

$$W_{4.7}(p) = W_{H.2.9}(p); \quad W_{4.7}(p) = K_{I\varphi};$$

$$W_{4.8}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{Y.5}(p) \cdot W_{Y.8}(p) \cdot W_{C.4}(p) \cdot W_{H.1.6}(p) + W_{H.2.6}(p);$$

$$W_{4.8}(p) = \frac{k_{I\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\varphi} \cdot \frac{1}{T_{2.Y} \cdot p + 1} \cdot K_{CM4} \\ \cdot \frac{k_{H.1.2} \cdot k_{I\varphi} \cdot (T_{H.1.2} \cdot p + 1)}{T'_{H.1.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \times \\ \times \frac{k_{H.2.2} \cdot k_{I\varphi} \cdot (T_{H.2.2} \cdot p + 1)}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p};$$

$$W_{4.9}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{y.5}(p) \cdot W_{y.8}(p) \cdot W_{C.4}(p) \cdot W_{H.1.8}(p);$$

$$W_{4.9}(p) = \frac{k_{i\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{\varphi} \cdot \frac{1}{T_{2,y} \cdot p + 1} \cdot K_{CM4} \cdot \frac{k_{H.1.4} \cdot k_{i\varphi}}{T'_{H.1.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p},$$

$$W_{4.10}(p) = W_{H.2.5}(p) \cdot W_{y.6}(p) \cdot W_{y.7}(p) \cdot W_{y.8}(p);$$

$$W_{4.10}(p) = \frac{k_{i\varphi}}{T'_{H.2.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p} \cdot k_{G.2} \cdot k_{n.2} \cdot \frac{1}{T_{2,y} \cdot p + 1};$$

$$W_{4.11}(p) = W_{H.2.8}(p); \quad W_{4.11}(p) = \frac{k_{H.2.4} \cdot k_{i\varphi}}{T'_{H.1.1} \cdot p + 1} \cdot e^{-T_0 \cdot p};$$

$W_{C.1}(p)$, $W_{C.2}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий по температуре воздуха в смесительной камере;

$W_{C.4}(p)$, $W_{C.5}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих воздействий по относительной влажности воздуха в смесительной камере;

$W_{C.3}(p)$ – передаточная функция, учитывающая связность параметров воздуха, а именно, зависимость изменения относительной влажности смешанного воздуха от изменения его температуры в смесительной камере;

$W_{ЭВ}(p)$ – передаточная функция электровентильатора;

$W_{0.1}(p) \dots W_{0.4}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для воздухоохладителя по температуре;

$W_{0.5}(p) \dots W_{0.8}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для воздухоохладителя по относительной влажности;

$W_{0.9}(p)$ и $W_{0.10}(p)$ – передаточные функции, учитывающие связность параметров воздуха в воздухоохладителе.

$W_{н.1.1}(p) \dots W_{н.1.4}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для воздухонагревателя первой ступени по температуре;

$W_{н.1.5}(p) \dots W_{н.1.8}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для воздухонагревателя первой ступени по относительной влажности;

$W_{н.1.9}(p)$ – передаточные функции, учитывающие связность параметров воздуха в воздухонагревателе первой ступени;

$W_{y.1}(p) \dots W_{y.4}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для парового увлажнителя по температуре;

$W_{y.5}(p) \dots W_{y.8}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для парового увлажнителя по относительной влажности;

$W_{y.9}(p)$ – передаточные функции, учитывающие связность параметров воздуха в паровом увлажнителе;

$W_{н.2.1}(p) \dots W_{н.2.4}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для воздухонагревателя второй ступени по температуре;

$W_{н.2.5}(p) \dots W_{н.2.8}(p)$ – передаточные функции по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий для воздухонагревателя второй ступени по относительной влажности;

$W_{н.2.9}(p)$ – передаточные функции, учитывающие связность параметров воздуха в воздухонагревателе второй ступени

$$T_0 = \frac{2 \cdot \alpha_H \cdot F_T \cdot M_T}{G_B \cdot \left(k_0 \cdot F_T - \frac{k_0 \cdot c_B \cdot F_T \cdot G_B}{G_W \cdot c_W} - 2 \cdot G_B \cdot c_B \right)};$$

$$k_{0.1} = \frac{k_0 \cdot F_T - 2 \cdot G_B \cdot c_B}{k_0 \cdot F_T - \frac{k_0 \cdot c_B \cdot F_T \cdot G_B}{G_W \cdot c_W} - 2 \cdot G_B \cdot c_B};$$

$$k_{0.2} = \frac{k_0 \cdot F_T \cdot c_B \cdot t_{эс}}{G_W \cdot c_W \cdot \left(k_0 \cdot F_T - \frac{k_0 \cdot c_B \cdot F_T \cdot G_B}{G_W \cdot c_W} - 2 \cdot G_B \cdot c_B \right)};$$

$$k_{0.3} = \frac{2 \cdot k_0 \cdot F_T}{k_0 \cdot F_T - \frac{k_0 \cdot c_B \cdot F_T \cdot G_B}{G_W \cdot c_W} - 2 \cdot G_B \cdot c_B};$$

$$k = \frac{2 \cdot (t_{2n} - t_{w1})}{G_w} \cdot \frac{n \cdot \frac{2 \cdot G_B \cdot c_B}{k_0 \cdot F_T} + \frac{G_B \cdot c_B}{G_w \cdot c_w}}{\left(\frac{2 \cdot G_B \cdot c_B}{k_0 \cdot F_T} + \frac{G_B \cdot c_B}{G_w \cdot c_w} + 1 \right)^2},$$

где n – показатель степени;

c_T – теплоемкость металла трубок оребрения;

α_n – коэффициент теплоотдачи

$$T'_{3,0} = 0.5 \cdot T_3; T_{3,0} = 0.1 \cdot T_3$$

$$T_3 = \frac{M_T}{10^{-3} \cdot r \cdot G_B} \cdot \frac{0.622 \cdot p''}{p - \phi_0 \cdot p''};$$

$$k_{\partial\phi} = \frac{0.622 \cdot p''}{p - \phi_B \cdot p''}; k_{0,9} = k_{0,10} = \frac{C_B(\xi - 1)}{10^{-3} \cdot r};$$

$$k_{\text{тф}} = \ln 10 \cdot \left(\frac{3.142305 \cdot 10^3}{T^2} - \frac{8.2}{T \cdot \ln 10} + 0.0024804 \right);$$

$$T_{1,H} = \frac{2 \cdot \alpha_H \cdot M_T}{k \cdot G_{\Pi}}; T_{2,H} = \frac{M_T \cdot c_T + M_{\Pi} \cdot c_{\Pi}}{G_{\Pi} \cdot c_{\Pi} + \frac{k_H \cdot F_T}{1-m}}$$

$$k_{H,1} = 1; k_{H,2} = \frac{2 \cdot (t_{\Pi} - t_B)}{G_B} \cdot \frac{(1-m) \cdot \frac{2 \cdot G_B \cdot c_B}{k_H \cdot F_T} + \frac{G_B \cdot c_B}{G_{\Pi} \cdot c_{\Pi}}}{\left(\frac{2 \cdot G_B \cdot c_B}{k_H \cdot F_T} + \frac{G_B \cdot c_B}{G_{\Pi} \cdot c_{\Pi}} + 1 \right)^2};$$

$$k_{H,3} = 2; k_{H,4} = \frac{2 \cdot r_{\Pi}}{k_H \cdot F_T};$$

где M_{Π} – масса пара, проходящего через воздухонагреватель;

c_T, c_{Π} – теплоемкость воздухонагревателя и пара;

m – показатель степени критерияльного уравнения теплообмена.

$$T'_{1,H} = 0,5 \cdot T_1, c;$$

$T_{3.H}$ – время запаздывания воздухонагревателя как объекта регулирования ($T_{3.H} = 0,01 \cdot T_1$; $T_{3.H} = 2.0970$ с)

$$k_{i\varphi} = \ln 10 \left(\frac{3,142305 \cdot 10^3}{T^2} - \frac{8,2}{T \cdot \ln 10} + 0,0024804 \right).$$

Сформулированная цель управления объектом (обеспечение требуемого качества стабилизации параметров воздуха в переходном и установившихся режимах нормальной эксплуатации СКВ) достаточно полно выполняется при минимизации функции потерь известного вида [4; 5]

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \bar{X}^T(t) \cdot Q \cdot \bar{X}(t) dt + \bar{X}^T(t) \cdot \bar{P} \cdot \bar{X}(t), \quad (3)$$

где Q, \bar{P} – неотрицательно определенные симметрические матрицы весовых коэффициентов;
 T – операция транспонирования матрицы.

Первое слагаемое в формуле (3) представляет собой квадратичный интегральный критерий скорости перехода системы из начального в нулевое состояние. Т.е. первое слагаемое является критерием суммарного отклонения $\bar{X}(t)$ от нулевого состояния на интервале времени $[t_0, t_1]$. Весовая матрица Q определяет вес каждой из компонент состояния. Второе слагаемое является мерой отклонения состояния системы в момент времени t от нулевого состояния.

Определить оптимальное управление для объекта, описываемого управлением (2) с критерием (3) можно, используя метод интегральных оценок [5], с помощью которого оптимальный закон управления системой в установившемся состоянии имеет вид

$$\bar{U}(t) = -G^{-1} \cdot B^T \cdot \bar{P} \cdot \bar{X}(t), \quad (4)$$

где G^{-1} – диагональная положительно определенная симметрическая матрица весовых коэффициентов.

Установившееся решение \bar{P} является решением частного случая алгебраического уравнения Риккати

$$\bar{A}^T \cdot \bar{P} + A \cdot \bar{P} + Q = 0. \quad (5)$$

Как видно из сравнения выражения (5) с известным алгебраическим уравнением Риккати, постоянный множитель Лагранжа в нем отсутствует, а значит, отсутствует нелинейный член в выражении (5).

$$\int_{t_0}^{t_1} \bar{U}^T(t) G \bar{U}(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} \bar{X}^T(t) \bar{P} B G^{-1} B^T \bar{P} \bar{X}(t) dt = C(X_0) = const. \quad (6)$$

Таким образом, задача критерия (3) при выполнении условия (6) является изопараметрической и сводится к задаче на безусловный экстремум. Величина константы

$C(X_0)$ в уравнении (6) зависит в этом случае от начальных условий, что нежелательно.

Используя выражения (2), (3) и (5) можно получить следующую функцию:

$$I = 2 \int_{t_0}^{t_1} \bar{U}^T(t) B^T \cdot \bar{P} \cdot \bar{X}(t) dt + X_0^T \cdot \bar{P} \cdot X_0 \geq 0. \quad (7)$$

Неотрицательное значение I в (7) следует из неотрицательной определенности Q и \bar{P} .

Если подставить в уравнение (7) уравнение (4), то получим ограничение (6), где

$$C(X)_0 = X_0^T \cdot \bar{P} \cdot X_0.$$

Таким образом, изопараметрическое ограничение вида (6) в данном случае отражает не только требования к качеству управления, но и необходимые условия математического решения задачи.

Покажем, что для задач стабилизации, характеризуемых так называемыми естественными начальными условиями, т.е. $\bar{X}_1 = 0$; $t_1 = \infty$, ограничение (6) можно ослабить. При оптимальном управлении (4) уравнение состояния объекта может быть записано в виде

$$\dot{\bar{x}} = (A - B \cdot G^{-1} \cdot B^T \bar{P}) \cdot \bar{X}(t), \quad X(t_0) = X_0. \quad (8)$$

В результате из уравнений (4) и (7) следует

$$-2 \int_{t_0}^{t_1} X_0^T \cdot \Phi^T(t) \cdot \bar{P} \cdot B \cdot G^{-1} \cdot B^T \cdot \bar{P} \cdot \Phi(t) \cdot \bar{X}_0 dt + X_0^T \cdot \bar{P} \cdot X_0 \geq 0, \quad (9)$$

где $\Phi(t)$ – фундаментальная матрица, полученная из выражения

$$\bar{X}(t) = \bar{\Phi}(t) \cdot X_0.$$

Неравенство (9) с учетом независимости вектора X_0 от времени можно представить в виде

$$X_0^T \left\{ \bar{P} - 2 \int_{t_1}^{t_2} \bar{\Phi}^T(t) \cdot \bar{P} \cdot G^{-1} \cdot B^T \cdot P \cdot \bar{\Phi}(t) dt \right\} X_0 \geq 0. \quad (10)$$

Выражение в фигурных скобках является симметрической матрицей $D(t)$. Выражение (10) – квадратичная форма для обеспечения неотрицательной определенности, которой должна быть неотрицательно определена матрица $D(t)$. При естественных начальных условиях матрица $D(t)$ не зависит от \bar{X}_0 , а условие (10) обеспечивается выбором диагональной матрицы коэффициентов G^{-1} в зависимости от свойств матриц A , B и Q . Равенство в выражении (10) соответствует $I=0$.

Так как в реальных системах на управляющие воздействия наложены ограничения

$$|\bar{U}_i| \leq \bar{U}_{m_i}(t), \quad (11)$$

то для критерия (3) и при условии

$$2 \sum_{i=1}^R \bar{U}_{m_i}(t) \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left| \sum_{i=1}^R b_{ii} \cdot \sum_{f=1}^n Z_{if}(t) \cdot \bar{X}_f(t) \right| dt \leq C(X_0) \quad (12)$$

оптимальное управление релейно

$$\bar{U}_i(t) = -\bar{U}_{m_i}(t) \operatorname{sign} \left\{ \sum_{i=1}^R b_{ii} \cdot \sum_{f=1}^n Z_{if}(t) \cdot \bar{X}_f(t) \right\}, \quad (13)$$

где $Z_{if}(t)$ – управляемая переменная

В выражении (13) формирование знака осуществляется по закону формирования линейного управления (4).

По сравнению с линейным релейное управление оптимально только при равенстве в выражении (12), которое при заданных $\bar{U}_{m_i}(t)$ и X_0 в общем случае невыполнимо. Поэтому оптимальное управление в

целом должно быть линейным с насыщением, определяемым уравнением (11).

Таким образом, определение закона управления (4) фактически сводится к решению матричного уравнения (5), которое в скалярной записи содержит $\frac{1}{2}n(n+1)$ алгебраических уравнений вида

$$\sum_{i=1}^R [Z_{ji}(t) \cdot a_{ij} + Z_{ji}(t) \cdot a_{if}] = -q_{if}, \quad (14)$$

где $j, f = 1, 2, \dots, n$

Необходимая для решения системы уравнений (14) матрица $Q = \{q_{if}\}$ обычно диагональная. В системе (14) для разработанной модели содержится семьдесят шесть уравнений. Эта система легко разбивается на совокупность систем из 1, 2, 3 и 4-х уравнений, что позволяет получить соответствующие аналитические решения.

Полученная в результате система уравнений оптимального управления имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1(t) &= K_{11} [b_{1.1} \cdot \bar{\Psi}_3(t) + b_{2.1} \cdot \bar{\Psi}_5(t) + b_{3.1} \cdot \bar{\Psi}_6(t) + b_{4.1} \cdot \bar{\Psi}_{14}(t)]; \\ \bar{U}_2(t) &= K_{22} [b_{1.2} \cdot \bar{\Psi}_3(t) + b_{2.2} \cdot \bar{\Psi}_5(t)]; \\ \bar{U}_3(t) &= K_{33} [b_{3.3} \cdot \bar{\Psi}_6(t) + b_{4.3} \cdot \bar{\Psi}_{14}(t)]; \\ \bar{U}_4(t) &= K_{44} [b_{3.4} \cdot \bar{\Psi}_6(t) + b_{4.4} \cdot \bar{\Psi}_{14}(t)]; \\ \bar{U}_5(t) &= K_{55} [b_{3.5} \cdot \bar{\Psi}_6(t) + b_{4.5} \cdot \bar{\Psi}_{14}(t)], \end{aligned} \quad (15)$$

где $\bar{\Psi}_k(t) = \sum_{f=1}^k Z_{ji}(t) \cdot \bar{X}_i(t)$.

Таким образом, каждое управляющее воздействие в (15) является линейной комбинацией фазовых координат с соответствующими координатами. Очевидно, что система обладает статизмом, но ее повышенная устойчивость позволяет выбирать K_{11} , K_{22} , K_{33} , K_{44} , K_{55} достаточно большими.

Несмотря на относительную сложность закона управления, его аппаратная реализация проста. Большинство коэффициентов в реальных

диапазонах значений параметров модели изменяются слабо, что позволяет свести их к постоянным коррекциям, исключив тем самым из числа настроечных параметров управляющего устройства.

Оптимальное управляющее устройство с законом (15) обеспечивает стабилизации температуры и относительной влажности воздуха, а при соответствующей коррекции параметров может применяться во всех режимах обработки воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рымкевич А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха.* – М.: Стройиздат, 1990. – 299 с.
2. *Вычужанин В.В. Розвиток засобів автоматизації й керування СКП // Холод.* – № 3. – 2007. – С. 40-43.
3. *Вычужанин В.В. Энергоэффективные режимы работы судовой СКВ // Вісник Одеського національного морського університету. Зб. наук. праць.* – 2007. – № 21. – С. 77-88.
4. *Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления.* – М.: Мир, 1977. – 650 с.
5. *Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского.* – М.: Наука, 1987. – 711 с.

Надійшла 15. 02. 08

К ВОПРОСУ ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ БИЗНЕС-ЕДИНИЦ (СБЕ)

В статье рассмотрена проблема идентификации СБЕ при разработке корпоративной стратегии судоходной компании и осуществлении портфельного анализа. Предложено использование Центральной статистической классификации для выявления видов деятельности (основного, вспомогательного, дополнительного), а также вида диверсификации судоходной компании.

Ключевые слова: судоходная компания, портфельный анализ, стратегическая бизнес-единица (СБЕ), отрасль, вид экономической деятельности.

Вопросы стратегического управления судоходными предприятиями для современного состояния подотрасли морского транспорта заслуживают тщательного исследования. Одним из приоритетных направлений развития судоходных компаний является стратегия диверсифицированного развития. Диверсификация представляется наиболее подходящим путем для инвестиции капиталов и уменьшения степени риска [1].

В первую очередь компании необходимо оценить текущее состояние и перспективность отдельных стратегических единиц бизнеса. В последующем результаты такой оценки используются для принятия решений относительно того, какие направления деятельности (отдельные продукты) следует развивать, а какие необходимо ликвидировать [2].

В настоящее время учеными и практиками разработан ряд аналитических методов и моделей, которые используются при обосновании принятия стратегических решений. Наиболее известны: матрица Ансоффа, подходы к анализу конкуренции М. Портера, матрицы портфельного анализа Бостонской консультационной группы (BCG), консультационных фирм McKinsey и Arthur D. Little, а также проект PIMS (Profit Impact of Market Strategies). Одним из наиболее часто применяемых западными корпорациями инструментов стратегического менеджмента является портфельный анализ [2-5].

Целью настоящей статьи является решение задачи индентификации стратегических бизнес-единиц (СБЕ), как видов деятельности судоходной компании, осуществляющей стратегию диверсификации.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить понятие «портфель предприятия»;
- дать характеристику СБЕ как основной структурной единице при проведении портфельного анализа предприятия;
- рассмотреть Центральную статистическую классификацию продукции по видам экономической деятельности в качестве возможной методологической базы для идентификации СБЕ судоходной компании;
- разделить все виды экономической деятельности предприятия на основные, второстепенные и вспомогательные;
- идентифицировать СБЕ судоходной компании, как виды деятельности, по которым возможна ее диверсификация.

Портфель предприятия, или корпоративный портфель, – это совокупность относительно самостоятельных хозяйственных подразделений, принадлежащих одному и тому же владельцу, которые в терминологии стратегического менеджмента принято называть стратегическими бизнес-единицами (СБЕ) [6].

Портфельный анализ представляет собой инструмент, с помощью которого руководство предприятия выявляет и оценивает свою хозяйственную деятельность с целью вложения средств в наиболее прибыльные или перспективные ее направления и сокращения либо прекращения инвестиций в неэффективные проекты. При этом оценивается относительная привлекательность рынков и конкурентоспособность предприятия на каждом из этих рынков. Предполагается, что портфель компании должен быть сбалансирован, т.е. должно быть обеспечено правильное сочетание подразделений или продуктов, испытывающих потребность в капитале для обеспечения роста, с хозяйственными единицами, располагающими некоторым избытком капитала.

Целью портфельного анализа является оценка товарно-рыночных возможностей организации за рамками ее настоящей деятельности и вынесение окончательного решения: должна ли организация изменить границы своего портфеля с помощью диверсификации, интернационализации или иных действий, принятых отдельно либо в совокупности.

Предназначение методов портфельного анализа заключается в том, чтобы помочь менеджерам понять бизнес, создать ясную картину формирования затрат и прибылей в компании, осуществляющей стратегию диверсификации. Это, в свою очередь, требует тщательного анализа возможностей и угроз для каждой СБЕ [5].

Теоретической базой портфельного анализа является концепция жизненного цикла товара, опытная кривая и база данных PIMS. При этом портфельный анализ рекомендует, чтобы для целей разработки стратегии каждый продукт компании, ее хозяйственные подразделения рассматривались независимо, что позволяет сравнивать их между собой и с конкурентами [3].

Все виды деятельности предприятия (ассортимент продукции) разбиваются на СБЕ. Задача идентификации или выделения бизнес-единиц достаточно сложна, особенно для крупных корпораций. Считается, что СБЕ должна:

- обслуживать рынок, а не работать на другие подразделения предприятия. Эмпирические исследования западных специалистов, в частности данные проекта PIMS, свидетельствуют, что если свыше 60 % продукции производственной единицы используется внутри фирмы другой производственной единицей, то целесообразно рассматривать эти два подразделения как один объект для целей стратегического анализа;
- иметь своих потребителей и конкурентов;
- руководство бизнес-единицы должно контролировать ключевые факторы, которые определяют успех на рынке.

Руководствуясь указанными положениями, перед предприятием встает вопрос – что собой представляет бизнес-единица: отдельную фирму, подразделение предприятия, продуктовую линию или отдельный продукт? Ответ зависит от сложившейся на предприятии структуры управления. В организациях с функциональной структурой управления в качестве бизнес-единицы выступает продуктовый ассортимент, тогда как при дивизиональной структуре основной единицей анализа является хозяйственное подразделение [5].

Известна также трактовка понятия СБЕ как стратегического хозяйственного подразделения (СХП), которое представляет собой направление или ряд смежных направлений деятельности организации, самостоятельное рыночно ориентированное хозяйственное подразделение, которое может выступать полноценным конкурентом на своем сегменте рынка, имеет свой круг поставщиков, потребителей и конкурентов. Оно возглавляется директором, который несет полную ответственность за стратегическое развитие и текущую деятельность СХП [3].

По-нашему мнению, эти два понятия по своей сути являются тождественными. Таким образом, для осуществления портфельного анализа компании, осуществляющей проекты диверсификации, необходима единая методологическая база для идентификации СБЕ.

Выполнение идентификации невозможно без выявления классификационных признаков рассматриваемого множества и построения его классификационной структуры. Для украинских предприятий предлагается использовать действующую Центральную статистическую классификацию продукции по видам экономической деятельности (Центральную статистическую классификацию), которая является составной частью единой системы национальных статистических классификаций.

Центральная статистическая классификация разработана в рамках европейской гармонизации с целью внедрения основных статистических

классификаций Европейского Союза и их приложения во всех отраслях статистики, а также в соответствии с планом действий относительно реализации Стратегии развития государственной статистики на период до 2008 года, утвержденного распоряжением Кабинета Министров Украины от 15.02.2006 (№ 82-р).

Центральная статистическая классификация согласно [7] обеспечивает:

- гармонизацию с модельной Классификацией продукции по видам экономической деятельности Европейского Союза (СРА, 2002);
- основу для создания отраслевых номенклатур продукции (товаров и услуг);
- описание видов экономической деятельности через соответствие «деятельность-продукция»;
- определение и кодировку видов экономической деятельности в соответствии с продукцией;
- проведение статистических обследований и анализа статистической информации на макроуровне (составление межотраслевого баланса производства и распределения товаров и услуг в соответствии с системой национальных счетов);
- сопоставление национальной статистической информации с информацией Статистической Комиссии Европейского Союза (Евростата), ООН и статистических служб других стран;
- создание составного элемента подсистемы автоматизированного ведения классификаций Госкомстата.

Объектами классификации в Центральной статистической классификации являются виды продукции (товаров и услуг), созданные в результате экономической деятельности.

Центральная статистическая классификация состоит из Классификации видов экономической деятельности (КВЭД, ДК 009:2005), утвержденной приказом Держспоживстандарта от 26.12.2005 № 375 с изменениями и дополнениями, внесенными приказом Держспоживстандарта от 26.02.2007 № 40 и Статистической классификации продукции (СКП).

Классификации видов экономической деятельности (КВЭД) предназначены для классификации данных, которые относятся исключительно к единицам экономической деятельности, в частности, деятельности отдельного предприятия, части предприятия или группы предприятий, которые составляют одну статистическую единицу. Классификация дает основу для подготовки статистических данных относительно выпуска продукции, с учетом факторов производства (рабочая сила, сырье, производственные мощности, и тому подобное), накопления основного капитала и финансовых операций этих единиц.

КВЕД предназначена для кодировки разных отраслей, то есть общественно организованных видов экономической деятельности, нап-

равленных на производство товаров или услуг. КВЕД не охватывает определенные экономические действия или финансовые операции по перераспределению дохода, в частности, погашение ссуд, уплату процентов, и тому подобное, а также деятельность, не принадлежащую к экономической сфере [7].

Статистическая классификация продукции (СКП) предназначена для сведения в одну группу продукции (товаров и услуг), имеющей общие характеристики. Она является основой для подготовки статистических данных относительно производства, торговли, распределения, потребления, внешней торговли и транспортировки этой продукции.

СКП разработана как базовая статистическая классификация продукции, которая может использоваться в неизменном виде или, при необходимости, быть основой, на которой создаются отраслевые номенклатуры продукции (товаров и услуг) с необходимой детализацией, определенной в отрасли.

СКП классифицирует товары и услуги, которые являются результатом экономической деятельности, и описывает их с разных сторон (производство, торговля, использование) [8].

Для создания национальной системы статистических классификаций видов экономической деятельности, продукции, товаров, в соответствии с методическими рекомендациями Евростата, был использован международный опыт и модельные европейские классификации в неизменном виде, а детализация, которая учитывает национальные особенности, осуществлялась на последующих уровнях классификации (подклассов) путем дробления самых детальных рубрик европейских классификаций (классов).

Национальная система статистических классификаций унаследовала межклассификационные связи, которые существуют среди международных экономических классификаций. Такой подход обеспечивает единственную интерпретацию национальных классификаций с международными, стандартизацию терминов, определений, понятий.

Выделим несколько основных понятий, применяемых в КВЭД и СКП.

В Хозяйственном кодексе Украины и статистических классификациях термин «*отрасль*» определяется как деятельность совокупности производственных (статистических) единиц, которые принимают участие в преимущественно одинаковых или подобных видах экономической деятельности.

В КВЕД наиболее обобщенными являются группировки видов экономической деятельности на уровне секций (в отрасли промышленности – на уровне подсекций), что позволяет выделить основные отрасли экономики. Однако некоторые отрасли могут быть выделены и на более детализированных уровнях классификации. Например, секция и «Дея-

тельность транспорта и связи» объединяет две отрасли – транспорт и связь, которые можно выделить только на уровне разделов, а в разделе 92 «Деятельность в сфере культуры и спорта, отдыха и развлечений», деятельность в сфере культуры от сферы спорта можно отделить на уровне групп [7].

Соответствие «деятельность-продукция» между КВЕД и СКП позволяет описать продукцию (товары и услуги), полученную при осуществлении видов экономической деятельности, в разрезе отраслей экономики. В табл. 1 представлен фрагмент Центральной статистической классификации продукции по видам экономической деятельности, позволяющий произвести идентификацию СЕБ судоходной компании, осуществляющей стратегию диверсификации.

Экономическая деятельность – процесс производства продукции (товаров и услуг), который осуществляется с использованием определенных ресурсов: сырья, материалов, оборудования, рабочей силы, технологических процессов и тому подобное. Экономическая деятельность характеризуется расходами на производство, процессом производства и выпуском продукции (товаров и услуг).

В связи с тем, что предприятие может осуществлять не один, а несколько видов экономической деятельности разного характера, для их классификации (группировки) определяются основной, второстепенный и вспомогательный виды экономической деятельности.

Основной вид экономической деятельности (ОВД) – вид деятельности предприятия, на который приходится наибольший взнос в валовую добавленную стоимость. При этом ОВД необязательно имеет 50 или больше процентов в валовой добавленной стоимости. На практике, в связи со сложностью расчета на уровне предприятия показателя валовой добавленной стоимости по видам экономической деятельности, для определения ОВД применяют показатели:

- объем реализованной продукции (товаров и услуг). Этот показатель является наиболее универсальным для разных видов экономической деятельности;
- среднегодовая численность работников.

Предприятие при осуществлении первичного (оперативного) и бухгалтерского учета результатов своей работы обеспечивает накопление информации, с помощью которой определяются или рассчитываются основные показатели хозяйственной деятельности, стоимость выработанной и реализованной продукции и промежуточное потребление, численность персонала и затраты на его содержание.

Второстепенным видом экономической деятельности является любой другой вид экономической деятельности предприятия (кроме определенного в качестве основного) по производству продукции, товаров или предоставлению услуг. Так, в международной статистической практике

Таблица 1

Фрагмент Центральной статистической классификации продукции по видам экономической деятельности [4]

Рівень	Назва	Рівень	Назва
I	<p>Діяльність транспорту та зв'язку</p> <p>Ця секція включає:</p> <ul style="list-style-type: none"> діяльність пасажирського або вантажного залізничного, трубопровідного, автомобільного, водного та повітряного транспорту; допоміжну діяльність, таку як діяльність терміналів і місць стоянки, транспортне оброблення вантажів, складське господарство; діяльність пошти та засобів зв'язку; оренду транспортних засобів з водієм або обслуговуючим персоналом; послуги з організації подорожувальників; капітальний ремонт або переобладнання транспортних засобів, крім автомобілів (див. 35) будівництво, технічне обслуговування і ремонт автодоріг, залізниць, портів, аеропортів (див. 45) технічне обслуговування та ремонт автомобілів (див. 50.20) оренду транспортних засобів без обслуговуючого персоналу (див. 71.1, 71.2) рекламу на транспортних засобах (див. 74.40) 	I	<p>Послуги транспорту і зв'язку</p>
61	Діяльність водного транспорту	61	Послуги водного транспорту
61.1	<p>Діяльність морського транспорту</p> <ul style="list-style-type: none"> оренду прогулянкових суден з екіпажем оренду прогулянкових суден з екіпажем 	61.10	Послуги морського транспорту

Продовження табл. 1

Рівень	Назва	Рівень	Назва
61.10.1	<p>Діяльність морського пасажирського транспорту</p> <p><i>Цей підклас включає:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • перевезення пасажирів морським транспортом за розкладом чи без розкладу • експлуатацію екокурсійних, прогулянкових та туристичних суден • експлуатацію поромів, водних таксі, інших плавазасобів • здавання в оренду засобів морського транспорту з екіпажем <p><i>Цей підклас не включає:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • послуги ресторанів, кафе, їдалень, барів на борту суден, за винятком послуг, які входять до транспортних (див. 55.30, 55.40, 55.51) 	<p>61.10.1</p> <p>61.10.11</p> <p>61.10.12</p> <p>61.10.2</p>	<p>Послуги морського пасажирського транспорту з закордонних та каботажних перевезень</p> <p>Послуги з перевезення пасажирів поромами</p> <p>Послуги морського пасажирського транспорту іншого</p> <p>Послуги морського вантажного транспорту з закордонних та каботажних перевезень</p>
61.10.2	<p>Діяльність морського вантажного транспорту</p> <p><i>Цей підклас включає:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • перевезення вантажів морським транспортом усіх видів сполучення, включаючи послуги буксирів, або плаваючих платформ, бурових установок • оренду плавазасобів з екіпажем тощо • транспортне перероблення вантажів, зберігання вантажів, портові операції та інші • допоміжну діяльність, таку як: ремонт суден, лоцманські послуги, навантаження та розвантаження суден, рятувальні роботи (див. 63) 	<p>61.10.21</p> <p>61.10.22</p> <p>61.10.23</p> <p>61.10.24</p> <p>61.10.25</p>	<p>Послуги морського вантажного транспорту з перевезення заморожених чи охолоджених продуктів</p> <p>Послуги морського вантажного транспорту з перевезення сирої нафти</p> <p>Послуги морського вантажного транспорту з перевезення вантажів рідких чи газоподібних інших</p> <p>Послуги морського вантажного транспорту з перевезення вантажів у контейнерах</p> <p>Послуги морського вантажного транспорту з перевезення пошти</p>

Продолжение табл. 1

Рівень	Назва	Рівень	Назва
63.4	Організація перевезення вантажів	63.4	Послуги з організації вантажних перевезень
63.40.0	Організація перевезення вантажів	63.40	Послуги з організації вантажних перевезень
	<i>Цей підклас включає:</i>	63.40.1	Послуги вантажних транспортних агентств
	• експедицію перевезень залізничним, автомобільним, водним, авіаційним транспортом;	63.40.11	Послуги суднових транспортних агентств
	• приймання групових та індивідуальних партій вантажів включаючи підбір вантажів та групування вантажів;	63.40.12	Послуги експедиційні інші
	• підготування транспортної документації та супровідних листів;	63.40.20	Послуги з організації вантажних перевезень інші
	• організацію групового управління вантажів залізничним, автомобільним, авіаційним або водним транспортом, включаючи збирання та розподілення вантажів;		
	• послуги митних брокерів;		
	• послуги фрахтових агентів (морського транспорту) та експедиторів (інших видів транспорту);		
	• операції з транспортного оброблення вантажів: тимчасове пакування з метою збереження під час транзитного перевезення, розпакування, зняття проб, зважування вантажів тощо;		
	• послуги транспортних агентств		
	<i>Цей підклас не включає:</i>		
	• кур'єрську діяльність (див. 64.12);		
	• діяльність, пов'язану з організацією страхування вантажів (див. 67.20)		

Продолжение табл. 1

Рівень К	Назва	Рівень К	Назва
74.5	Операції з нерухомим майном, оренда, інжениринг та надання послуг підприємцям	74.5	Послуги, пов'язані з нерухомим майном, орендою, інженирингом, послуги для підприємців
74.50.0	Підбір та забезпечення персоналом	74.50.1	Послуги з підбору персоналу
	Цей підклас включає:	74.50.11	Послуги з підбору штатного персоналу
	<ul style="list-style-type: none"> пошук персоналу та розподілення по місцях роботи; такі послуги надаються потенційним роботодавцям або потенційним робітникам; опис робіт, що мають виконуватись (наприклад, складання посадових інструкцій), відбір та тестування претендентів на отримання роботи, розгляд рекомендацій тощо; пошук та працевлаштування висококваліфікованих кадрів (агентами з працевлаштування); діяльність з найму тимчасової робочої сили: забезпечення підприємств на підрядній основі; найманою робочою силою для виконання тимчасових робіт агентством, яке сплачує їм винагороду за виконану роботу. 	74.50.12	Послуги з підбору нештатного персоналу
	Цей підклас не включає:	74.50.2	Послуги із забезпечення персоналом
	<ul style="list-style-type: none"> діяльність підприємців з наймання сільськогосподарських робітників (див. 01.4) діяльність імпресарію (див. 74.87) діяльність, пов'язану з підбором акторів на ролі у кінофільмах, телевізійних передачах, театральних виставах (див. 92.72) 	74.50.21	Послуги із забезпечення допоміжним персоналом

принято считать второстепенным – вид экономической деятельности при условии, если объем такой деятельности составляет свыше 10 % от общих показателей деятельности предприятия или не менее 5 % от общего объема деятельности в соответствующем виде экономической деятельности в регионе.

Продукция, которая производится по основным или второстепенным видам экономической деятельности, предназначена для реализации на рынке.

Вспомогательные виды экономической деятельности – виды деятельности, результаты которых используются самим предприятием с целью обеспечения его основного и второстепенных видов экономической деятельности. Вспомогательные виды деятельности не учитываются при расчете ОВД, однако информация относительно этой деятельности включается в статистические показатели по основному виду экономической деятельности предприятия.

Деятельность считается вспомогательной, если она отвечает таким условиям:

- предназначена для предоставления услуг или производства промежуточных товаров, которые не входят в состав конечной продукции данного предприятия;
- связана с текущими расходами самого предприятия, то есть, не приводит к образованию основного капитала;
- направлена на обслуживание только самого предприятия, то есть, выработанные в результате осуществления этой деятельности продукция, товары и услуги не реализуются на рынке;
- является типичной для подобных предприятий.

К вспомогательным относятся такие виды экономической деятельности как управление, бухгалтерский учет, транспортировка, складирование, закупка, сбыт, ремонт, техническое обслуживание, и тому подобное. Типичными являются такие виды вспомогательной деятельности:

- услуги собственного транспорта;
- сохранение, закупка собственной продукции;
- бухгалтерский учет, административно-хозяйственная деятельность.

Не рассматриваются как вспомогательные следующие виды экономической деятельности:

- производство товаров или услуг, которое способствует накоплению основного капитала: например, строительные работы, которые выполняются за собственный счет (их следует относить к секции «Строительство»);
- производство продукции, часть которой продается на коммерческой основе на рынке, даже если часть ее потребляется в процессе основной деятельности предприятия;

- производство товаров, которые в последующем становятся составной частью продукции, выпускаемой в результате основного или второстепенных видов экономической деятельности, например, изготовление одним из подразделов предприятия ящиков для упаковки своей продукции;
- производство энергии, которое осуществляется электростанцией, являющейся подразделением, входящим в состав предприятия, даже если вся выработанная энергия потребляется этим предприятием для производства продукции;
- закупка товаров для их перепродажи без переработки;
- исследования и разработки.

На основании изложенного создается возможность идентификации СЕБ как видов деятельности, по которым осуществляется диверсификация судоходных компаний следующих видов:

- в смежные виды деятельности (в данной отрасли) – например, экспедирование, агентирование, услуги таможенного брокера, фрахтование (раздел 63.4 КВЕД – Организация перевозок грузов).
- в новые виды деятельности (новая отрасль) – крьюинг (раздел 74.5 КВЕД – Подбор и обеспечение персоналом).

Таким образом, идентифицировав СБЕ судоходной компании, возможно в дальнейшем произвести портфельный анализ для определения оптимальных направлений ее диверсифицированного развития. Обоснование выбора таких направлений диверсификации является предметом наших дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лапкина И.А., Ветошникова М.А. Стратегии диверсификации деятельности судоходных компаний // Методы та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ – 2007. – № 12. – С.192-203.
2. Ансофф И. Новая корпоративная стратегия. – СПб.: Издательский дом, 1999. – 416 с.
3. Виханский О.С. Стратегическое управление: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 1998. – 296 с.
4. Фатхутдинов Р.А. Стратегический менеджмент: Учебник для вузов. – 2-е изд., доп. – М.: ЗАО «Бизнес-школа «Интел-Синтез», 1998. – 416 с.
5. Маркова В.Д., Кузнецова С.А. Стратегический менеджмент. Курс лекций. – М.: Издательство ИНФРА-М-Сибирское соглашение, 1999. – 287 с.

6. Василенко В.О., Ткаченко Т.І. Стратегічне управління: Навч. посібник. – К.: ЦУЛ, – 2003. – 395 с.
7. Національний класифікатор України ДК 009:2005 «Класифікація видів економічної діяльності» (КВЕД), затверджений наказом Держспоживстандарту № 375 від 26.12.2005 із змінами і доповненнями, внесеними наказом Держспоживстандарту № 40 від 26.02.2007.
8. Державний класифікатор України ДК 016-97 «Державний класифікатор продукції та послуг» (ДКПП), затверджений наказом Держстандарту № 822 від 30.12.97 із змінами та доповненнями, внесеними наказами Держстандарту № 507 від 17.08.2000, № 402 від 05.06.2002 та наказом Держспоживстандарту № 40 від 26.02.2007.

Надійшла 15.02.08

УДК 629.123:539.4:519.863

Э.П. Лукаш
В.В. Олейников
М.И. Партолога

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

В статье излагается способ приближенной оптимизации упругих систем при ограничениях на параметры напряженно-деформированного состояния. Вектор состояния предлагается представить в виде разложения в ряд по формам свободных колебаний конструкции. Гипотеза о постоянстве форм свободных колебаний конструкции в процессе изменения геометрических характеристик оптимизируемых элементов позволяет резко сократить вычислительный ресурс. Погрешность, обусловленная принятой гипотезой, не превышает допустимой в обычных инженерных расчетах реальных конструкций. Рассматривается пример анализа оболочечной конструкции речного бúa.

Ключевые слова: метод конечных элементов, оптимизация, метод случайного поиска.

Современный уровень культуры проектирования судовых конструкций, предполагающий активное использование методов их оптимизации по различным критериям качества, во многом определяет коммерческую привлекательность проектных решений. Решение задач оптимального проектирования является сложной технико-экономической проблемой, которая может быть сформулирована как задача математического программирования по отысканию экстремума некоторого критерия качества, функционально зависящего от параметров проектирования x_i . Подобные задачи в последнее время обретают все большую практическую значимость.

Большинство математических моделей, в которых требуется минимизировать целевую функцию $\Phi\{X\}$ путем изменения компонент вектора переменных проектирования $\{X\}^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, являются нелинейными [1]. В общем виде решение сводится к нахождению вектора $\{X^*\}^T = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, определяющего условие

$$\Phi\{X\} \rightarrow \min \quad (1)$$

при системе проектных ограничений

$$g_j \{X\} \leq, =, \geq b_j \quad (j = 1, 2, \dots, m). \quad (2)$$

В зависимости от вида функции качества, наличия и вида ограничений, применяются те или иные методы математического программирования (линейные, нелинейные, динамическое программирование, методы случайного поиска и др.).

Сложность моделей оптимизируемых объектов и существующих методов оптимизации нелинейных систем объясняют стремление исследователей найти новые, более совершенные методы решения рассматриваемых задач оптимизации.

Практические результаты оптимизации реальных судовых конструкций могут быть получены лишь при использовании численных методов прямого анализа в сочетании с одним из методов оптимизации на базе определенных упрощающих гипотез [2], использование которых, особенно при оптимизации конструкций, подверженных динамическим нагрузкам, приводит к существенной экономии вычислительного ресурса.

Рассмотрим алгоритм оптимизации конструкции при ограничениях на динамические напряжения. В качестве функции цели удобно принять минимальную металлоемкость

$$\Phi \{X\} = \min. \quad (3)$$

Ограничения по напряжениям связаны, как правило, с выполнением нормативных требований, отражающих те или иные критерии прочности

$$[L] \{q\} = \{S\} \leq \{s\}. \quad (4)$$

Расчетные напряжения $\{S\}$ являются нелинейными функциями вектора управляемых параметров $\{X\}$. Их линейная аппроксимация может быть получена путем разложения в ряд Тейлора в окрестности начальных значений вектора $\{S_0\}$ и удержанием соответствующих членов разложения.

$$\{S(X)\} = \{S_0\} + \Sigma \partial \{S\} / \partial x_i (\{X\} - \{X_0\}) + \dots \quad (5)$$

Вычисление производных по контролируемым параметрам x_i можно выполнить с помощью (2) для каждого элемента

$$\partial \{S_e\} / \partial x_i = \partial [L_e] / \partial x_i \{q_e\} + [L_e] \partial \{q_e\} / \partial x_i. \quad (6)$$

Заметим, что производная матрицы начальных напряжений $[L_e]$ может

быть вычислена для рассматриваемых конечных элементов (КЭ) аналитическим путем и включена в программную библиотеку в качестве специальной матрицы для многократного ее использования при вычислении левой части неравенства (4). Для вычисления производной вектора обобщенных перемещений $\{q_e\}$ необходимо располагать соответствующим решением уравнения состояния, которое для динамических задач имеет вид

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{P(t)\}, \quad (7)$$

где $[M]$ – матрица масс системы;
 $[C]$ – матрица демпфирования;
 $[K]$ – матрица жесткости системы;
 $\{q\}$ – вектор неизвестных перемещений.

Разложение решения $\{q\}$ по формам свободных колебаний приводит к существенной экономии вычислительного ресурса при решении задач рассматриваемого типа.

Приняв гипотезу о независимости нормированных по кинетической энергии форм свободных колебаний от вектора контролируемых параметров $\{\hat{V}_i(X)\} = const$ и учитывая свойства их ортогональности [2], вместо (5) получим серию скалярных уравнений следующего вида:

$$\ddot{q}_i + \beta \cdot \dot{q}_i + \Lambda_i \cdot q_i = Q_i, \quad (8)$$

где β – параметр демпфирования конструкции;
 Λ_i – квадрат i -й частоты свободных колебаний;
 $Q_i = |\hat{V}_i^T \cdot P \cdot t|$ – обобщенная нагрузка на i -й форме.

Решение скалярных уравнений (8) будет зависеть от вида правой части

$$q(t) = \alpha_d q_{ст}. \quad (9)$$

Статическое обобщенное перемещение в рамках принятой гипотезы полностью определяется квадратом частоты, поскольку нагрузку также можно считать постоянной в процессе вариации вектора $\{X\}$

$$q_{ст} = Q_i / \Lambda_i.$$

Коэффициент динамичности будет зависеть от соотношения частот свободных и вынужденных колебаний и для гармонической нагрузки, например, вычисляется по следующей формуле:

$$\alpha_d = ((1 - z^2)^2 + (2\beta z)^2)^{-0.5}, \quad (10)$$

где $z = \omega/\lambda$ – соотношение частот.

Для вычисления вектора $\partial\{q\}/\partial x_i$ в (8) можно использовать соотношение (9), из которого следует

$$\partial\{q\}/\partial x_i = \Sigma(\partial\alpha_d/\partial x_i q_{ct} + \partial q_{ct}/\partial x_i \alpha_d) |\tilde{V}|_i . \quad (11)$$

Линеаризация функции $S(X)$ связана с вычислением производной от переменной $\Lambda_i(X)$, которая определяется формулой Релея, имеющей в нашем случае упрощенную структуру

$$\Lambda_i = \{ \tilde{V}_i \}^T [K] \{ \tilde{V}_i \} , \quad (12)$$

или

$$\Lambda_i = \sum_e \{ \tilde{V}_i e \}^T [Ke] \{ \tilde{V}_i e \} . \quad (13)$$

Здесь суммирование осуществляется для всех $e = 1, 2, 3, \dots$, n элементов дискретной модели.

Как правило, в процессе оптимизации рассматриваются элементы лишь отдельного фрагмента конструкции, содержащего m элементов, тогда (13) целесообразно представить в виде суммы

$$\Lambda_i = \sum_1^m \{ \tilde{V}_i e \}^T [Ke] \{ \tilde{V}_i e \} + \sum_{m+1}^n \{ \tilde{V}_i e \}^T [Ke] \{ \tilde{V}_i e \} . \quad (14)$$

В таком случае второе слагаемое не зависит от вектора $\{X\}$ и искомая производная будет определяться формулой

$$\partial \Lambda_i / \partial x = \sum_1^m \{ \tilde{V}_i e \}^T [\partial Ke / \partial x] \{ \tilde{V}_i e \} . \quad (15)$$

Входящая в последнее выражение матрица производных $\partial[Ke]/\partial x_i$ также как и $\partial[Le]/\partial x_i$ из (6), может быть вычислена аналитическим путем и включена в программную библиотеку матриц конечных элементов.

Таким образом, описанный подход решения оптимизационной задачи позволяет рассматривать модели реальных конструкций, подверженных статическим либо динамическим нагрузкам, поскольку вычисления, связанные с необходимой линеаризацией задачи, выполняются в рамках общепринятых для МКЭ процедур. Определение оптимального вектора $\{X\}$, являющегося решением задачи, осуществляется методом случайного поиска с пошаговым самообучением. Заметим, что принятые гипотезы вносят определенную погрешность в результаты расчетного анализа. Однако при рассмотрении реальных конструкций эта погреш-

ность мала, и приемлемость решения можно оценить прямым расчетом модели с найденным вектором управляемых параметров $\{X\}$.

Рассмотрим пример прочностного анализа речного буга, представляющего композитную оболочку вращения. Минимальные толщины оболочки σ_p вычислены, исходя из условия статической прочности

$$\sigma_p(t_{\min}) \leq [\sigma]. \quad (16)$$

Все нагрузки, действующие на конструкции буга, разделены на две категории:

- вызываемые воздействием окружающей среды (волнения, течения, ветра, льда, температуры и проч.);
- создаваемые собственным весом и весом якорного устройства.

Каждая из этих категорий включает постоянные и переменные во времени нагрузки. В зависимости от реакции конструкции на внешнее воздействие различают динамические и квазистатические нагрузки.

Нагрузку на буг со стороны окружающей среды можно считать квазистатической. Величина коэффициента динамичности α_d в этом случае близка к единице, поскольку период собственных колебаний буга τ_6 соизмерим с периодом волн малой длины, не способных заметно влиять на напряженное состояние конструкций буга. Волны большей длины имеют сравнительно большой период τ_a и оказывают лишь статическое действие, т.е.

$$\alpha_d = [(1 - (\tau_6/\tau_a)^2)^{-1}] \approx 1. \quad (17)$$

В соответствии с рекомендациями [3] для пластмассовых конструкций величина местной нагрузки на оболочку принята равной

$$h_p = 10(h_1 + \Delta), \quad (18)$$

где h_1 – расстояние между нижним и верхним дисками пластиковой оболочки буга $\Delta = 1,5$ м.

Местная нагрузка на нижний диск буга при сбросе на воду при установке на точку

$$h_c = 20 \text{ кПа.}$$

Коэффициент запаса устойчивости $n = 1$. Допускаемая стрелка прогиба $1/50$ расстояния между дисками оболочки буга.

Ветровые нагрузки определяются по формуле [4]

$$Q_w = 10^{-3} \rho_w (0.5 w_{10})^2 \Sigma S_j K_{1j} K_{2j}, \quad (19)$$

где Q_w – равнодействующая сил ветра, кН;

- ρ_w – массовая плотность воздуха кг/м³;
 w_{10} – расчетная скорость ветра на высоте 10 м от уровня тихой воды при десятиминутном осреднении;
 S_j – площадь парусности j-го элемента;
 K_{1j} – коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра по высоте;
 K_{2j} – коэффициент сопротивления формы j-го элемента.

В нашем случае для максимальной парусности S

$$Q_w = 10^{-3} 1,29 (0,5 \ 43) 22,475 0,78 = 1,15 \text{ кН}.$$

В качестве основного материала изделия используется полиэтилен низкого давления с удельным весом $\gamma = 0,942$ г/см³. Физические константы материала:

- модуль Юнга первого рода $E_{Iz2} = 1,1 \cdot 10^4$ МПа ;
- модуль Юнга второго рода $G = 0,37 \cdot 10^4$ МПа ;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$.

Предел прочности для сухих образцов при $t = 200$ С:

- при растяжении $Re = 80$ МПа;
- при сжатии $Re = 110$ МПа;
- при сдвиге $Re = 40$ МПа.

Расчетные значения модулей упругости $E_p = 0,6 E$; $G_p = 0,6 G$.

Допускаемые напряжения:

- при кратковременном воздействии $[\sigma] = 0,25Re$ $[\tau] = 0,25Re$;
- при постоянном воздействии $[\sigma] = 0,10Re$ $[\tau] = 0,10Re$.

Остов бую выполнен из стали марки Ст3Сп с пределом текучести $\sigma_T = 235$ Мпа.

Допускаемые напряжения для конструкций остова

$$[\sigma] = 0,80Re = 188 \text{ МПа}.$$

В качестве вектора управляемых параметров $\{X\}$ приняты толщины композитной оболочки корпуса бую.

Рассматриваемый бую представляет собой композитную пространственную конструкцию, содержащую полиэтиленовую оболочку с легким наполнителем, закрепленную на металлическом остова – трубе с элементами креплений ее двух ветвей посредством резьбового соединения (рис. 2 и 3).

Поэтому в качестве основных применяются пространственные оболочечные конечные элементы Shell-93 с 8 узлами на контуре элемента. Конечноэлементная модель построена с учетом возможности анализа

общих и местных деформаций. В местах ожидаемой концентрации напряжений изменялась сетка конечных элементов таким образом, чтобы можно было установить пик напряжений.

Поскольку прогнозируемый уровень напряжений лежит ниже пределов пропорциональности выбранных материалов конструкции, использовалась геометрически и физически линейная модель.

При выборе типа расчетных моделей учитывались рекомендации [3; 4]. При этом использовалась модель для определения общих напряжений в конструкциях бую. Трехмерное представление основных связей позволило обеспечить приложение нагрузок в виде наиболее приближенном к реальному и моделировать их с достаточной точностью.

Локальные модели использовались для расчета прочности отдельных связей и соединительных элементов.

Несущими элементами конструкции являются пространственные оболочки вращения, которые аппроксимируются высокоточными оболочечными элементами с 8 узлами на контуре. Принятый тип конечного элемента Shell-93 отражает картину деформаций и напряжений для всех рассматриваемых случаев нагружения. Ребра жесткости, устанавливаемые для обеспечения равномерной передачи усилий с остова на полиэтиленовую оболочку, моделировались самостоятельными участками пластин адекватной конфигурации.

Размер сетки конечно-элементной определялся характеристиками принятого конечного элемента оболочки из условия обеспечения приемлемой точности расчетного анализа. При этом учитывалась геометрия конструкции, расположение и характер нагрузок, стыковка остова с оболочкой. Отношение размеров сторон, как правило, не превышало 3. При вычислении локальных концентраций напряжений в местах резкого изменения направления образующей оболочки вращения размер сетки конечных элементов менялся с учетом ожидаемого градиента напряжений.

Максимальная нагрузка соответствовала установке бую на точку.

При установке на точку рассматривался аварийный сброс бую с высоты.

В качестве расчетного принято равномерное давление на днище $p = 20$ кПа.

В силу симметрии нагрузки и модели рассматривалась лишь четверть оболочки, при обеспечении соответствующих граничных условий на разрезах, компенсирующих внутренние усилия взаимодействия отброшенной и рассматриваемой частей круговой оболочки.

Конечноэлементная расчетная модель оболочки вращения на металлическом остове представлена на рис. 4. На рис. 5 представлена нагрузка и граничные условия.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что конструкции бую выдерживают нагрузку при постановке на точку с достаточным запасом прочности.

Максимальные напряжения (рис. 6) составили:

- в металлическом диске остова 61,27 МПа;
- в пластиковой оболочке 18,4 МПа, что ниже допустимых напряжений, равных:
 - для стали 188 МПа;
 - для пластиковой оболочки 20 МПа.

Таким образом, критерий предельной прочности при заданных толщинах оболочки выполняется с запасом.

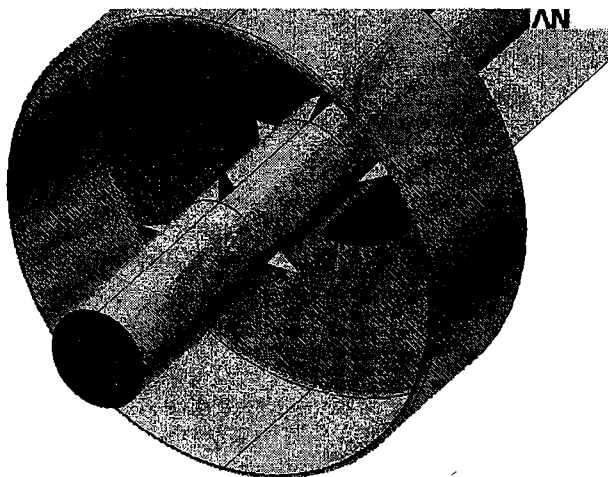


Рис. 1. Твердотелая модель (дно условно снято)

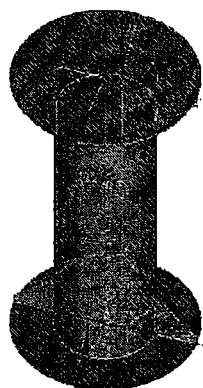


Рис. 2. Твердотелая модель металлического остова

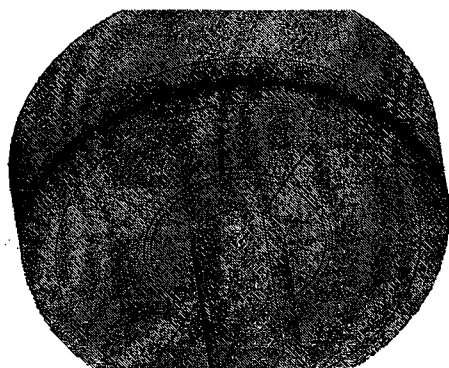


Рис. 3. Твердотелая модель системы (вид снизу)

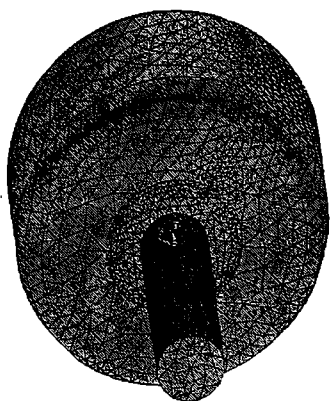


Рис. 4. Конечнотелементная модель



Рис. 5. Распределенная нагрузка и граничные условия

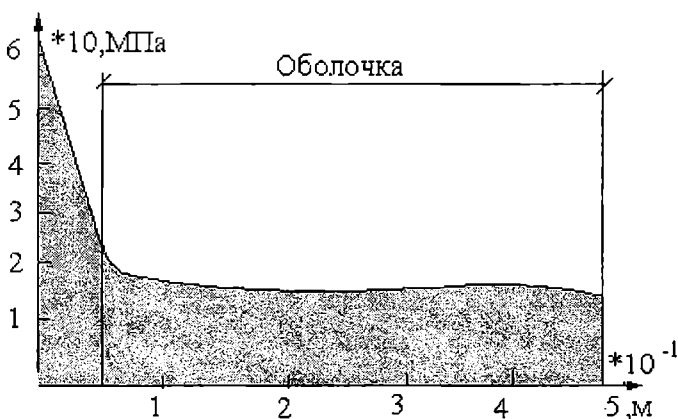


Рис. 6. Изменение напряжений (по Мизесу) в меридиальном сечении. Вертикальная ось совпадает с осью металлического остова

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукаш Э.П. Оптимизация параметров надежности корпусных конструкций. Тезисы докладов на международной конференции по строительной механике корабля памяти проф. Папковича П.Ф. – СПб., 2002.
2. Лукаш Э.П., Партолога М.И. Проектирование элементов судовых конструкций с заданным уровнем надежности // Вісник ОНМУ. – № 22. – С.114-122.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2004.
4. Правила классификации, постройки и переоборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2001.
5. Ашик В.В. Проектирование судов. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с.
6. Иосилевич Г.Б.и др. Прикладная механика. – М.: Высшая школа, 1989. – 351 с.

Надійшла 20.02.08

О КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ

Проведен анализ корреляционных зависимостей между параметрами кривых усталости, представленных тремя различными математическими моделями. Показано, что корректные корреляционные зависимости между параметрами кривых усталости можно получить лишь для одного материала или для близких по свойствам материалов.

Ключевые слова: корреляционные зависимости, параметры наклонного участка кривой усталости, кинетическая теория механической усталости, численный эксперимент, образцы.

В расчётной практике деталей машин для оценки сопротивления усталости часто используют методы, в основу которых положены регрессионные зависимости между параметрами кривой усталости, выраженной той или иной математической моделью и пределом выносливости. Эти зависимости получены на основе статистической обработки определённого количества экспериментальных данных и являются приближёнными [1; 2; 3; 4; 5]. Предполагается, что теоретической основой этих зависимостей является тот факт, что положение кривой усталости зависит от тех же факторов, что и предел выносливости.

Не останавливаясь на анализе погрешностей определения параметров кривых усталости, проведём их сравнительный анализ с точки зрения их принципиальных отличий. Для конкретизации поставленной задачи, ограничим этот анализ объектами, изготовленными из углеродистых и легированных сталей.

В работе [4] были предложены зависимости параметров m и C степенного уравнения кривой усталости от предела выносливости σ_R для углеродистых и легированных сталей в виде

$$m = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C; \quad (1)$$

$$C = F_C(\sigma_R) = \alpha_C (m + 1) \lg \sigma_R + \beta_C, \quad (2)$$

где a_C , b_C , α_C , β_C – коэффициенты.

Из выражений (1) и (2) можно определить точку перелома кривой усталости N_{GC} .

$$\lg N_{GC} = \phi(\sigma_R) = [m(a_C - 1) + \alpha_C] \lg \sigma_R + \beta_C. \quad (3)$$

Для объектов из углеродистых и легированных сталей принимают: $a_C = 0,027$; $b_C = 1,4$; $\alpha_C = 0,997$; $\beta_C = 4,0 + 0,5(2,5 - \lg \sigma_R)^2$, при $\lg \sigma_R < 2,5$ $\beta_C = 4,0$ (в среднем $\beta_C = 4,25$).

На основании обработки того же массива экспериментальных данных были получены уравнения регрессии в виде линейных функций для уравнения кривой усталости, в форме [6].

$$m_W = f_W(\sigma_R) = a_W \sigma_R + b_W = 0,002 \sigma_R + 0,8; \quad (4)$$

$$C_W = F_W(\sigma_R) = \alpha_W \sigma_R + \beta_W = 0,005 \sigma_R + 6,6, \quad (5)$$

где $a_W, b_W, \alpha_W, \beta_W$ – коэффициенты;

m_W и C_W – параметры уравнения Вейбулла. В приближённом варианте принимают $m_W = const = 1,0$, тогда

$$C_W = \lg \sigma_R + 5,1 \quad (6)$$

В работе [7] приведены корреляционные зависимости параметров r и A от предела выносливости σ_R (где $r = 1/(m_W + 1)$, $A = (m_W + 1) 10^{C_W / (m_W + 1)}$). Они были получены в результате статистической обработки параметров 388 кривых усталости деталей и лабораторных образцов из углеродистых и легированных сталей. При этом массив данных (параметров кривых усталости) формировался так, чтобы было учтено влияние вида напряжённого состояния, концентрации напряжений, масштабного фактора, марки стали, механической и химико-термической обработки, упрочнения путём поверхностного пластического деформирования, а также различных сочетаний этих факторов. Пересчитав параметры r и A в параметры m_W и C_W , получим искомые зависимости $m_W(\sigma_R)$ и $C_W(\sigma_R)$ в виде

$$m_W = f_W(\sigma_R) = \frac{1}{a_{W1} \sigma_R^{0,01} - b_{W1}} = \frac{1}{5,254 \sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1; \quad (7)$$

$$C_W = F_W(\sigma_R) = \lg \frac{(\alpha_{W1}\sigma_R + \beta_{W1})^{m_W+1}}{m_W+1} = \lg \frac{(7,029\sigma_R + 3599)^{m_W+1}}{m_W+1}, \quad (8)$$

где a_{W1} , b_{W1} , α_{W1} , β_{W1} – коэффициенты.

Для параметров кривой усталости, выраженной степенной моделью, установлены корреляционные зависимости между условным пределом прочности при изгибе $\sigma_{dП}$, угловым коэффициентом k и пределом выносливости при симметричном изгибе σ_{-1} [5; 6]:

- для углеродистых сталей

$$k = f_{П}(\sigma_R) = a_{П}\sigma_{-1} + b_{П} = 0,1\sigma_{-1} + 33,5; \quad (9)$$

$$\sigma_{dП} = F_{П}(\sigma_R) = \alpha_{Пd}\sigma_{-1} + \beta_{Пd} = 1,43\sigma_{-1} + 289,6; \quad (10)$$

- для легированных

$$k = 0,25\sigma_{-1} - 6,5; \quad (11)$$

$$\sigma_{dП} = 2,48\sigma_{-1} - 33,5; \quad (12)$$

- для углеродистых и легированных

$$k = 0,185\sigma_{-1} + 15,2; \quad (13)$$

$$\sigma_{dП} = 2,11\sigma_{-1} + 132,5, \quad (14)$$

где $a_{П}$, $b_{П}$, $\alpha_{П}$, $\beta_{П}$ – коэффициенты.

С целью определения долговечностей при напряжениях, соответствующих пределу выносливости, перейдём от параметра $\sigma_{dП}$ к параметру $N_{ГП}$ и тогда вместо зависимостей (12), (14) и (16) запишем:

- для углеродистых сталей

$$\lg N_{ГП} = \varphi_{П}(\sigma_{-1}) = (\alpha_{П}\sigma_{-1} + \beta_{П})/k = (0,43\sigma_{-1} + 289,6)/k; \quad (15)$$

- для легированных

$$\lg N_{GP} = (1,48\sigma_{-1} - 33,5) / k; \quad (16)$$

- для углеродистых и легированных

$$\lg N_{GP} = (1,11\sigma_{-1} + 132,5) / k. \quad (17)$$

С помощью приведенных выше зависимостей рассчитаем величины долговечностей, соответствующих пределу выносливости и разность $\sigma_{BG} - \sigma_R$ при значениях σ_R , находящихся в интервале значений 50-500 МПа (σ_{BG} — напряжение, соответствующее долговечности 10^5 циклов) (табл. 1).

Таблица 1

Расчётные значения разности напряжений $\sigma_{BG} - \sigma_R$ и долговечностей, соответствующих пределу выносливости

σ_R , МПа	$\sigma_{BG} - \sigma_R$, МПа согласно зависимостям:				Долговечность, соответствующая пределу выносливости (цикл.) согласно зависимостям:			
	1-3	4,5	7,8	13,17	1-3	4,5	7,8	13,17
50	65,6	113,6	191,4	65,7	1001918	7079458	120045439	48883417
100	84,9	125,9	145,9	75,0	1242796	12589254	31912082	16808126
200	105,1	146,8	122,3	93,5	1242796	39810717	11793147	6182836
300	121,1	163,8	119,2	112,0	2508119	125892541	7640998	3838472
400	130,8	177,8	122,9	130,5	3154046	398107171	5984387	2904053
500	136,8	189,6	130,1	149,0	3717313	1258925411	5127393	2418090

Анализируя данные таблицы, можно сделать следующие выводы:

1. Как разности напряжений $\sigma_{BG} - \sigma_R$, так и долговечности до разрушения, соответствующие пределу выносливости, для рассматриваемых корреляционных зависимостей существенно отличаются. При этом долговечности отличаются в некоторых случаях на несколько порядков.
2. В ряде случаев имеет место разная тенденция изменения указанных величин в зависимости от величины предела выносливости.

Приведенное расчётное обоснование позволяет говорить о том, что оценка характеристик сопротивления усталости на основе корреляционных зависимостей может использоваться при расчётах как первое приближение.

Для аналитической оценки корректности корреляционных зависимостей достаточно рассмотреть влияние на характеристики сопротивления усталости некоторых (основных) факторов. Ограничимся рассмотрением влияния материала, концентрации напряжений и размеров

объекта (образца, детали, модели). Смоделируем два случая сочетания указанных факторов применительно к стандартным образцам (гладким и надрезанным), нагруженным симметричным знакопеременным изгибом.

В первом случае будем полагать, что образцы изготовлены из одного и того же материала (сталь 45), но при этом их геометрические характеристики различны. Во втором случае примем, что образцы имеют разную форму рабочей части (при одинаковом её диаметре) и изготовлены из разных материалов.

Рассмотрим первый случай. Основываясь на результате эксперимента конкретных образцов с концентратором напряжений, примем $\sigma_R = 204$ МПа. Предел выносливости гладких образцов примем таким же. Диаметр рабочей части гладких образцов определим по величине масштабного фактора. Геометрические размеры (диаметры рабочего d и захватного D участков, глубина t и радиус выточки R), а также предел прочности σ_B , теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ и масштабный фактор ϵ_σ сравниваемых типов образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип образцов (форма рабочей части)	σ_B , МПа	σ_R , МПа	α_σ	ϵ_σ	Размеры, мм			
					D , мм	d , мм	t , мм	R , мм
С надрезом	640	204	1,56	-	12	10	1	2
Гладкий	640	204	-	0,82	60	60	-	-

Для сравнительного анализа характеристик сопротивления усталости образцов используем уравнение кривой усталости, основанное на кинетической теории усталостного разрушения [8]

$$N = \frac{Q}{\sigma} \ln \left[1 + \exp \frac{\sigma - \sigma_R}{\sigma_R - \sigma_{RT}} \right]^{-1}, \quad (18)$$

где Q – коэффициент выносливости, который в свою очередь пределяется по формуле

$$Q = -Q_T \ln \left[1 - \exp \frac{D_0}{1 - D_0} \frac{\sigma}{\sigma_R - \sigma_{RT}} \frac{\sigma_B}{\sigma_B - \sigma_R} \right], \quad (19)$$

где Q_T – коэффициент сопротивления росту усталостных трещин;

D_0 – степень исходного повреждения, связанная с несовершенством кристаллических решёток реального материала;

σ_B – предел прочности материала;

σ_{RT} – циклический предел текучести.

Для образцов, изготовленных из одного и того же материала все величины, входящие в формулы (18) и (19), теоретически одинаковы. Поэтому расчётные долговечности при напряжениях, превышающих предел выносливости, а следовательно и параметры наклонного участка кривой усталости должны быть равны. Для подтверждения этого вывода проведём численный эксперимент и определим параметры наклонного участка кривой усталости с помощью программного комплекса ANSYS. Исходными величинами при расчёте этих параметров по данной программе являются кривая усталости исходного материала, а также его геометрические и механические характеристики. В результате расчёта получены следующие значения параметров: для образцов с концентратором напряжений $m = 8,00$; $C = 24,21$, а для гладких образцов – $m = 8,24$; $C = 26,10$.

Рассмотрим второй случай. В качестве объектов для сравнения примем гладкие образцы из стали 45 и образцы с концентратором напряжений из более прочной стали, характеристики и марку которой определим ниже. Предел выносливости и параметры наклонного участка кривой усталости для гладких образцов примем (по имеющимся экспериментальным данным) соответственно равными 250 МПа; 8,07 и 25,62.

Для определения характеристик сопротивления усталости образцов с концентратором напряжений найдём (по заданному значению σ_R) предел выносливости для гладких образцов σ_{Rz} по формуле[9]

$$\sigma_{Rz} = 1 + q_B (\alpha_\sigma - 1) \quad \sigma_R = 1 + 0,97(1,56 - 1) \quad 250 = 384,9 \text{ МПа}, \quad (20)$$

где q_B – коэффициент, учитывающий чувствительность материала к концентрации напряжений. При этом предел прочности материала будет равен

$$\sigma_B = \sigma_{Rz} / 0,43 = 384,9 / 0,43 = 895,2 \text{ МПа}. \quad (21)$$

По величине σ_B подбираем марку стали (сталь 20ХГР). Сравнительные характеристики образцов обоих типов сведены в табл. 3.

Таблица 3

Тип образцов (форма рабочей части)	Марка стали	σ_B , МПа	σ_R , МПа	α_σ	Размеры, мм			
					D , мм	d , мм	t , мм	R , мм
С надрезом	Сталь 20ХГР	900	250	1,56	12	10	1	2
Гладкий	Сталь 45	570	250	1,03	12	10	1	50

Как и в первом случае обратимся к уравнениям (18) и (19). Очевидно, что величины D_0 , σ_B , σ_{RT} и Q_T , входящие в эти уравнения, для стали 45 и Стали 20ХГР будут различны. Следовательно, и параметры наклонных участков кривых усталости для сравниваемых объектов будут также различными.

Для рассмотренных типов образцов также с помощью программного комплекса ANSYS определены параметры наклонного участка кривой усталости ($m=11,9$ и $C=35,33$).

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что параметры наклонного участка кривых усталости для образцов из одного материала практически совпадают. В тоже время для разных материалов эти параметры существенно отличаются (параметр m – на 27%, и параметр C также – на 27%). Таким образом, на основании проведенного анализа, можно заключить, что корректные корреляционные зависимости между параметрами кривых усталости можно получить лишь, для одного материала или для близких по свойствам материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребеник В.М., Цапко В.К. *Надёжность металлургического оборудования: Справочник.* – М.: Металлургия, 1980. – 344 с.
2. Коновалов Л.В. *Нагруженность, усталость, надёжность деталей металлургических машин* – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.
3. Олейник В.Н. *Определение характеристик усталости деталей машин расчётным путём // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1986. – Вып. 43. – С. 100-106.*
4. Олейник В.Н. *Построение наклонных ветвей кривых усталости // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 6. – С. 18-23.*
5. Рогожкина А.Е., Гусева З.А. *Влияние абсолютных размеров детали на кривую усталости // Вестник машиностроения. – 1963. – № 6. – С. 37-38.*

6. Олейник Н.В., Магденко А.Н., Скляр С.П. Сопротивление усталости материалов и деталей машин в коррозионных средах. – К.: Наук. думка, 1987. – 200 с.
7. Коноплёв А.В., Селюкова // Детали машин: Респ. межвед. науч.- техн. сб. – 1988. – Вып. 46. – С. 102-104.
8. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости и её приложения. – Минск: Наука и техника, 1973. – 214 с.
9. Когаев В.П. Расчёты на прочность при напряжении переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.

Надійшла 28.01.08

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ С ПОМОЩЬЮ МКЭ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОСОВОГО ГИБКОГО ОГРАЖДЕНИЯ ОТКРЫТОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ВИСЕНИЯ СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Создана и исследована модель расчета пространственного напряженно-деформированного состояния НДС носового гибкого ограждения открытого типа под нагрузкой в режиме висения скегового судна на воздушной подушке с учетом весомости и жесткости материала гибкого ограждения при различных исходных данных. Приведены результаты численных расчетов и их анализ.

Ключевые слова: судно на воздушной подушке, гибкое ограждение, расчет прочности.

Носовые гибкие ограждения (ГО) скеговых судов на воздушной подушке (СВПС) могут быть двух типов. Первый тип – ГО с гибким ресивером и съемными элементами, второй тип – ГО открытого типа, представляющее собой ряд открытых сегментных элементов. Оба типа ГО ограничивают истечение воздуха из воздушной подушке (ВП) для поддержания избыточного статического давления в ней, обеспечивают беспрепятственное прохождение волн под днищем судна, что способствует перетеканию невозмущенного набегающего потока воды в воздушной подушке судна.

Для увеличения жесткости носового ГО и предотвращения его подлома применяется вертикальное секционирование ГО (рис. 1, а) с установкой вертикальных сегментных элементов (СЭ). Такое ГО называется открытым.

В отличие от носовых ГО с ресивером, носовое ГО открытого типа (рис. 1, б) не является амортизатором ударов, которые возникают при контактах носовой оконечности СВПС с волнами. Применение СЭ не всегда гарантирует предотвращение подлома ГО и не обеспечивает снижение сопротивления ГО до минимума. Однако относительная простота изготовления и монтажа на судне ГО открытого типа, отсутствие воздухопроводов в корпусе судна, уменьшение потерь на трение воздуха в воздухопроводах обуславливает применение ГО открытого типа на СВПС.

СЭ носового ГО открытого типа крепятся по верхнему периметру к мосту СВПС (рис. 1), по торцам – к скегам.

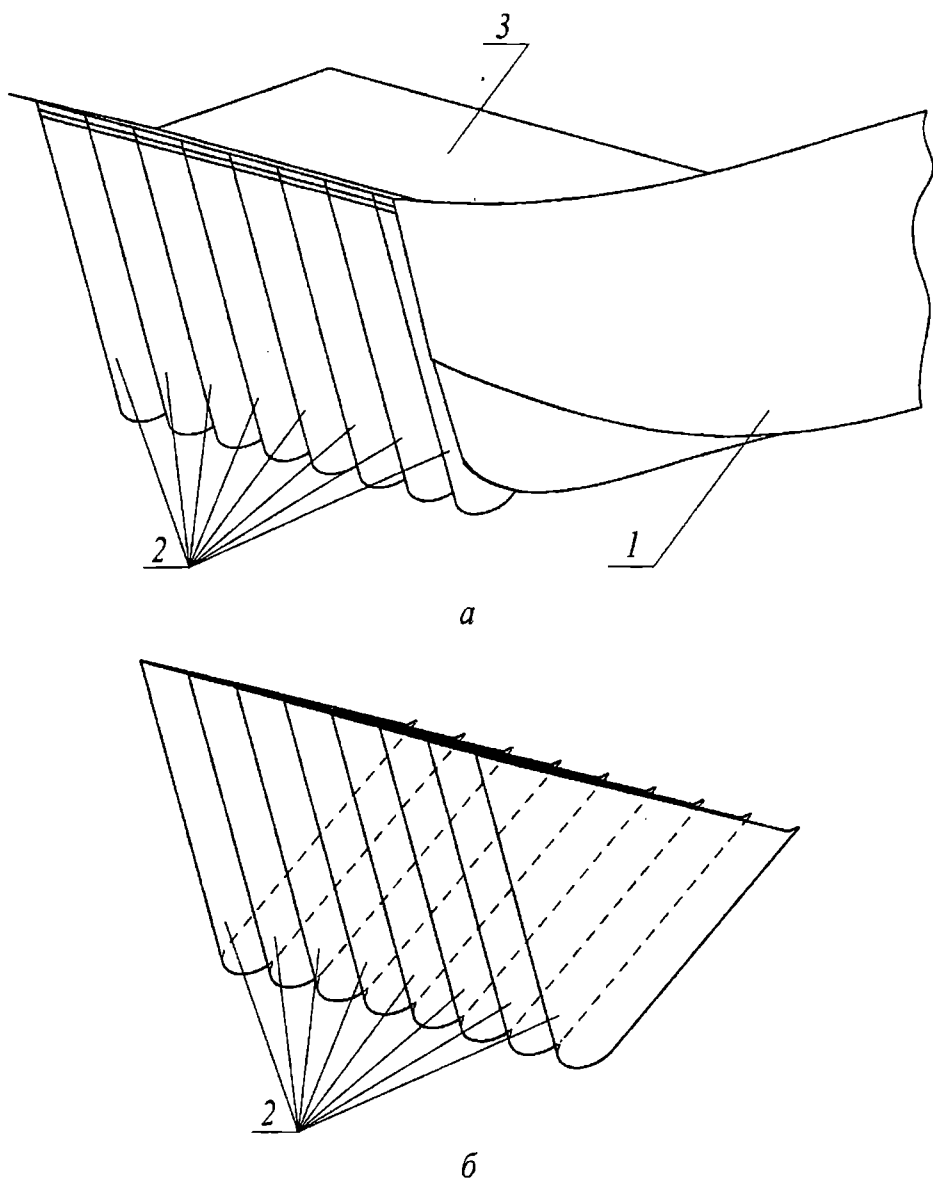


Рис. 1. Носовая оконечность СВПС с гибким ограждением:
а – носовая оконечность судна; б – носовое ГО открытого типа;
1 – скег; 2 – сегментные элементы гибкого ограждения; 3 – мост

В изучении механики ГО открытого типа до сих пор остается множество научных и практических проблем, которые еще далеки от разрешения. В настоящее время в литературных источниках отсутствуют исследования пространственных моделей носовых ГО открытого

типа, которые до сих пор далеки от совершенства, так как требуют применения при проектировании громоздких методов расчета.

Широко известны исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) носовых гибких ограждений с гибким ресивером [1-3; 7-10]. Съемные элементы таких ГО [4] по форме похожи на носовые ГО открытого типа. Однако носовые ГО открытого типа отличаются от съемных элементов ГО с гибким ресивером как условиями их закрепления на корпусе судна, так и условиями работы и размерами. Исследования автора в этом направлении ранее были посвящены рассмотрению плоского НДС носовых ГО открытого типа [5; 6]. Материалы по исследованию прост-ранственного НДС носовых ГО открытого типа с помощью метода конечных элементов (МКЭ) публикуются впервые.

Цель исследования – определение с помощью МКЭ максимальных напряжений по Мизесу и максимальных перемещений, возникающих в различных пространственных моделях носового ГО открытого типа СВПС под нагрузкой с учетом весомости и жесткости материала ГО, изучение их механики при различных исходных данных, анализ полученных результатов.

Рассмотрена мягкая оболочка носового ГО открытого типа СВПС, нагруженная избыточным давлением воздуха в воздушной подушке P_{Π} (рис. 2, а). Крепление ГО к мосту судна осуществляется по параллельным направляющим AuD . Угол наклона направляющих к горизонту равен δ . Носовая (наружная) кромка AM сегментного элемента наклонена к вертикали под углом α . Высота СЭ равна $h_{СЭ}$, длина наружной кромки СЭ равна $l_{СЭ}$. Угол между наружной кромкой AM СЭ и внутренней его кромкой MD равен β .

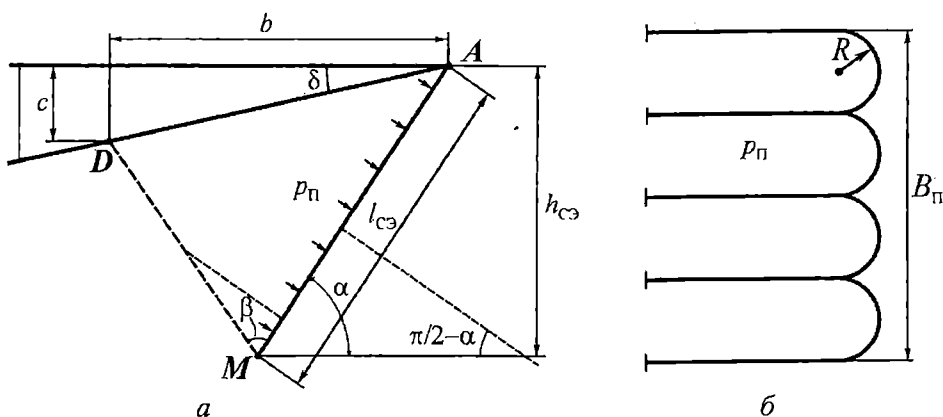


Рис. 2. Расчетная схема и схема конструкции ГО:
а – в меридиональном направлении; б – в радиальном направлении

Принятые допущения: материал оболочки ГО считается изотропным, весомым и растяжимым; сегментный элемент может ограниченно вращаться вокруг точки A . Раскрой оболочки задается таким, чтобы конструкция внешних частей СЭ приняла форму цилиндрической поверхности с радиусом R (рис. 2, б).

В качестве исходных данных принимаются (рис. 2): p_{Π} – избыточное давление воздуха в ВП, Па; $h_{СЭ}$ – высота СЭ, м; B_{Π} – ширина ВП, м; n – число СЭ на ширине ВП; углы α , β , δ ; толщина оболочки t , м; модуль Юнга E , МПа, коэффициент Пуассона ν .

Искомыми являются следующие величины (рис. 2): максимальные напряжения по Мизесу $\sigma_{miz.max}$, МПа; максимальные перемещения Δ_{max} , м; $l_{СЭ}$ – длина СЭ, м; $D = AD$ – расстояние между точками крепления СЭ на корпусе судна, м; b , c – соответственно длина и высота зоны крепления СЭ, м.

Расчет пространственной формы и пространственного НДС открытого носового ГО СВПС (с учетом веса и жесткости материала) выполнен с использованием МКЭ. Твердотельная модель, граничные условия и внешние нагрузки создаются и задаются с помощью программы, написанной на языке APDL.

Для расчета использовался 8-узловой оболочечный конечный элемент (КЭ) с опциональной возможностью вырождаться в 6-узловой треугольный конечный элемент.

Для создания твердотельной и конечно-элементной модели (рис. 3) рассматривалось полностью вся конструкция открытого носового ГО.

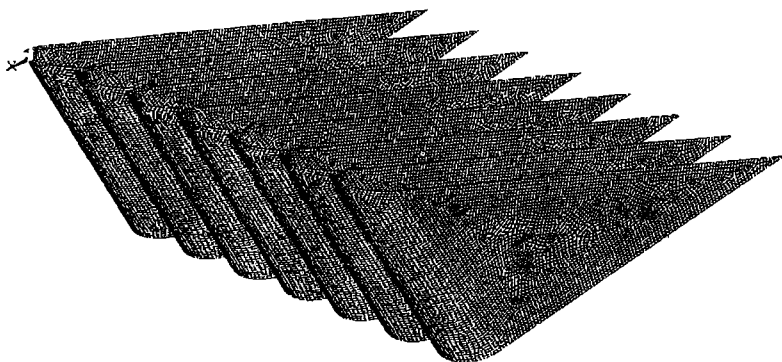


Рис. 3. Пространственная конечно-элементная модель открытого носового ГО СВПС

Влияние толщины оболочки ГО и угла β на максимальные напряжения по Мизесу и максимальные перемещения показано на численных примерах при следующих исходных данных: толщина оболочки

$t=1, 2, 3$ мм; избыточное давление воздуха в ВП $p_n = 3800$ Па; модуль Юнга $E = 13 \cdot 10^8$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0,4$; $b = 3,6$ м; $h = 0,6$ м; $A_2 = 2,1$ м; ширина ВП $B_{II} = 6,0$ м; число СЭ на ширине ВП $n = 7$ и 9 ; высота СЭ $h_{СЭ} = 3,6$ м; угол $\alpha = 65^\circ$; угол $\delta = 18^\circ$; угол $\beta = 55^\circ \dots 100^\circ$.

Геометрические соотношения для радиального сечения, (рис. 2, б) определяются зависимостями

$$R = \frac{B_I}{2n}; \quad L = R\pi,$$

где L – длина кольцевой части радиального сечения внешнего участка СЭ, м.

Графическое представление основных результатов расчетов показано на рис. 4 и 5, из которых следует, что максимальные напряжения по Мизесу и максимальные перемещения для всех пространственных моделей открытого носового ГО СВПС под нагрузкой в режиме висения СВПС с учетом весомости и жесткости материала ГО достигают минимальных величин при значении угла $\beta = 95^\circ$. В диапазоне изменений угла $\beta = 80 \dots 100^\circ$ максимальные значения напряжений по Мизесу практически для всех моделей не изменяются. При уменьшении угла от $\beta = 80^\circ$ до $\beta = 55^\circ$ происходит резкое возрастание максимальных напряжений и перемещений (рис. 4 и 5).

Так, при толщине материала ГО $t = 1$ мм и числе СЭ $n = 7$ максимальные напряжения по Мизесу возрастают в 2,66 раза от $\sigma_{miz. max} = 3,73$ МПа до $\sigma_{miz. max} = 9,92$ МПа в диапазоне изменений угла $\beta = 80 \dots 60^\circ$, а при той же толщине материала ГО и числе СЭ $n = 9$ напряжения возрастают в 3,55 раза от $\sigma_{miz. max} = 2,93$ МПа до $\sigma_{miz. max} = 10,40$ МПа в диапазоне изменений угла $\beta = 80 \dots 55^\circ$, в диапазоне $\beta = 80 \dots 60^\circ$ – в 2,77 раза от $\sigma_{miz. max} = 2,93$ МПа до $\sigma_{miz. max} = 8,11$ МПа.

При толщине материала ГО $t = 3$ мм и числе СЭ $n = 7$ напряжения возрастают в 3,21 раза от $\sigma_{miz. max} = 1,35$ МПа до $\sigma_{miz. max} = 4,34$ МПа в диапазоне изменений угла $\beta = 80 \dots 55^\circ$, а при тех же толщине материала ГО и диапазоне изменения угла β , но при числе СЭ $n = 9$ напряжения возрастают в 3,03 раза от $\sigma_{miz. max} = 1,16$ МПа до $\sigma_{miz. max} = 3,52$ МПа. Если угол β становится менее 60° при $t = 1$ мм и $n = 7$ решение отсутствует, так как происходит потеря устойчивости ГО.

При увеличении толщины материала от 1 мм до 3 мм максимальные напряжения по Мизесу уменьшаются в 3...4 раза.

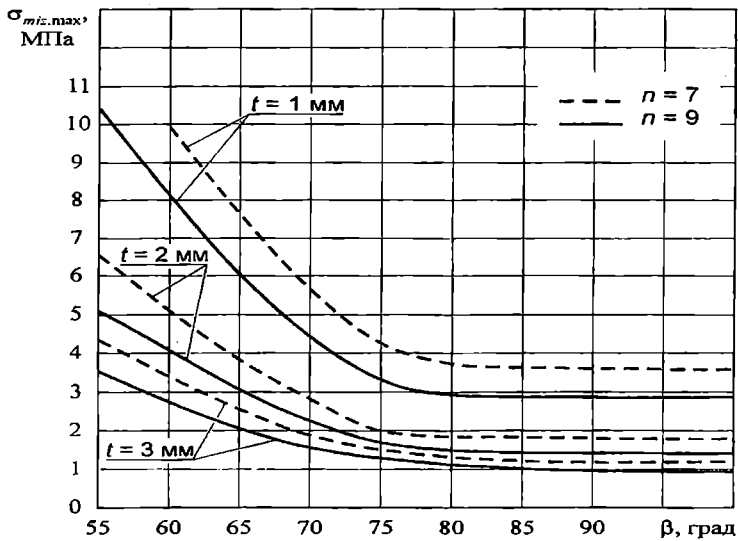


Рис. 4. Зависимости максимальных напряжений по Мизесу в оболочках пространственных моделей ГО открытого типа в режиме висения СВПС от угла β с учетом весомости и жесткости материала ГО

Аналогичная закономерность наблюдается и для максимальных перемещений (рис. 5).

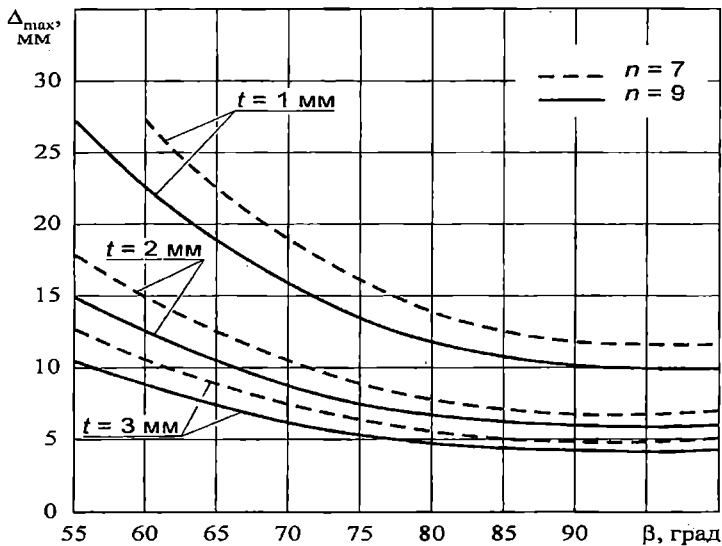


Рис. 5. Зависимости максимальных перемещений в оболочках пространственных моделей ГО открытого типа в режиме висения СВПС от угла β с учетом весомости и жесткости материала ГО

Выводы. Создана и исследована модель расчета пространственного НДС открытого носового ГО СВПС под нагрузкой в режиме висения СВПС с учетом весомости и жесткости материала ГО при различных исходных данных, проведен анализ полученных результатов. Выяснено, что при проектировании и расчете такого типа ГО с учетом весомости и жесткости его материала можно производить такой раскрой сегментных элементов и крепить ГО к мосту СВПС так, чтобы угол β был менее 90° . Однако этот угол все равно не должен быть меньше 60° для данной расчетной модели. С точки зрения конструктивного крепления ГО к корпусу СВПС нежелательно, чтобы угол β был более 90° , так как внутренняя направляющая D крепления ГО к мосту судна слишком далеко отодвигается вовнутрь ВП, то есть резко увеличивается зона крепления b сегментных элементов к мосту (рис. 2). При проектировании носового ГО открытого типа СВПС других моделей следует выполнить новые расчеты с помощью МКЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демешко Г.Ф. Ограждения воздушной подушки на судах и транспортных аппаратах: Учебное пособие. – Л.: ЛКИ, 1982. – 108 с.
2. Зайцев В.В. Механика ресивера гибкого ограждения амфибийного судна на воздушной подушке с учетом растяжимости материала // Вісник ОНМУ. – Одесса: ОНМУ, 2003. – № 12. – С. 57-64.
3. Зайцев В.В. Механика ресивера с диафрагмой гибкого ограждения СВПА // Судовождение: Сб. научн. тр. ОНМА. – Одесса: Феникс, 2003. – Вып. 6. – С. 46-52.
4. Зайцев В.В., Ван Л.К., Зайцев Д.В. Влияние угла скоса и высоты съёмных элементов на напряжения в гибких ограждениях судов на воздушной подушке. – Материалы I-ой Международной научно-практической конференции «Становление современной науки – 2006». Т. 1. – Технические науки. – Днепропетровск: Наука и образование, 2006. – С. 28-31.
5. Зайцев Д.В. Исследование напряженно-деформированного состояния носового гибкого ограждения открытого типа в режиме висения судна на воздушной подушке // Судовождение: Сб. научн. тр. ОНМА. – Одесса: Феникс, 2007. – Вып. 14. – С. 39-43.
6. Зайцев Д.В., Еганов А.Е., Зайцев В.В. Автоматизированный расчет гибкого ограждения открытого типа в режиме висения судна на воздушной подушке. – Материалы Международной научно-методической конференции «Автоматизация судостроительного производства и подготовка инженерных кадров: состояние, проблемы, перспективы». – Николаев: НУК, 2007. – С. 120-123.

7. *Кользаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. – Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.*
8. *Проектирование общесудовых устройств: Учебное пособие / В.В. Зайцев, А.Е. Еганов, Ю.Н. Коробанов, Э.В. Тольшев, В.В. Зайцев. – Николаев: Изд. «ИЛИОН»; изд. УГМТУ, 2004. – 300 с.*
9. *Смирнов С.А. Суда на воздушной подушке скегового типа. – Л.: Судостроение, 1983. – 216 с.*
10. *Liang Yun, Alan Bliault. Theory and design of air cushion craft. – London, Yun and A. Bliault, 2000. – 632 p.*

Надійшла 17.03.08

ОСОБЕННОСТИ СПУСКОПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

На основе анализа конструкций отечественных и зарубежных спускоподъемных устройств для подводных аппаратов и водолазов в жестких скафандрах получены статистические зависимости для спускоподъемных устройств, позволяющие определить тенденции их развития.

Ключевые слова: спускоподъемное устройство, подводный аппарат, водолазный колокол, судно-носитель.

Наиболее экстремальным режимом функционирования спускоподъемных устройств (СПУ) водолазных колоколов и подводных аппаратов (ПА) являются процессы касания (отрыва) ПА водной поверхности и спуск (подъем) в поверхностном слое воды. Воздействие ветровых волн и качка судна-носителя приводит к значительным динамическим нагрузкам в гибких связях и других элементах СПУ, которые следует учитывать при их проектировании.

Особенность эксплуатации отечественных, рассчитанных на грузоподъемность от 7 до 100 т и зарубежных СПУ водолазов в жестких скафандрах и ПА состоит в том, что они должны обеспечить надежный спуск (подъем) в оперативном режиме на большую глубину при волнении моря до 4 баллов (высота волн до 2,5 м) [1].

Массогабаритные показатели СПУ водолазов в жестких скафандрах и ПА существенным образом зависят как от массы и габаритов технических объектов спуска/подъема, так и от конструктивной схемы самого СПУ [4]. Так, например, вынос и удержание за бортом многотонного объекта на одном или двух кранах при сильном волнении требует максимального удаления его от борта судна. В противном случае удары будут происходить о борт судна.

В этом отношении шахтные СПУ имеют неоспоримые преимущества, так как они обычно осуществляют спуск/подъем технических объектов в районе диаметральной плоскости судна, где бортовая качка минимальна [3].

Устройства для спуска-подъема подвижных подводных технических средств океанотехники (подводных аппаратов) традиционно классифицируют по следующим признакам:

- выполнение спуска-подъема с движущегося судна-носителя или без его хода;
- размещение на судне-носителе (бортовое, кормовое, шахтное и т.п.);
- тип выносной металлоконструкции (рамные, ферменные, телескопические и т.п.);
- тип привода (электромеханический, гидравлический и т.п.).

Выносные металлоконструкции чаще других элементов подвержены изменениям при разработке новых конструктивных схем СПУ, так как другие конструктивные факторы требуют удовлетворения взаимоисключающих условий и выполняются исходя из существующих конструктивных решений. Например, размещение СПУ на судне-носителе порой зависит от свободного места на палубе и габаритов объекта спуска/подъема.

Традиционными конструкциями СПУ считаются шарнирные рычажные механизмы, в которых движение отдельных звеньев производится по закону, определяемому условиями безопасного выноса подводного аппарата за пределы корпуса судна-носителя.

ПКБ «Прогресс» спроектировало СПУ для плавучих объектов массой до 25 т с несущими металлоконструкциями параллелограмного типа, например, на судах «Гидронавт» и «Акванавт», СПУ для глубоководного аппарата «Тинро-2» грузоподъемностью 18 т [3].

Основные технические характеристики СПУ: грузоподъемность 16 т; скорость подъема плавучего объекта минимальная 3 м/мин, максимальная 10 м/мин; масса СПУ 51,2 т; работоспособность при волнении моря 5-6 баллов.

СПУ для ПА «Тинро-2» имеет максимальный вылет грузовых подвесок за борт судна по осям около 2,7 м. Среднее время проведения операции подъема ОПА из воды (без учета времени на подачу канатов-проводников ОПА на судно), заваливания СПУ с ОПА на борт, опускания ОПА в трюм и закрепления СПУ в положении по-походному и по штормовому составляет не более 40 мин. Масса комплекса СПУ – 40,2 т. Лебедка каната-проводника ЛЭГСА-4 дает тяговое усилие в канате в автоматическом режиме минимальное при выборе 3 кН и максимальное при травлении 4,8 кН; тяговое усилие в канате при выборе в ручном режиме 3 кН; скорость выбора и травления в ручном режиме 0,5 м/с, в автоматическом – 4,33 м/с. Диаметр каната-проводника 8,6 мм. Диаметры грузовых стальных канатов растяжек 23,5 мм и грузового полиспаста 31 мм. Основные технические характеристики современных отечественных СПУ (ПКБ «Прогресс») и некоторых зарубежных СПУ приведены в таблице.

Таблица

Основные технические характеристики современных СПУ

№ п/п	СПУ, год постройки	Объект спуска/подъема	Грузоподъемность, Ргр, т	Масса СПУ, М, т	Максимальный вылет за борт, L, м	Высота над палубой, H, м	$\Delta = R_{гр} / M$	Δ / H	$\Delta / H / L$
1.	ГСПУ-100 (бортовое), 1967	-	100	523	4,5	16	5,23	0,33	0,073
2.	Комплекс СПУ для заказа 1602 (кормовое), 1975	ПА "Тинро-2"	18	40,2	2,7	7,51	2,23	0,30	0,11
3.	Комплекс СПУ (бортовое), 1975	ПА "Пайсис"	12	36,6	3,09	-	3,05	-	-
4.	СПУВ-60 (бортовое), 1972	Водолазный колокол (56 т)	60	180	6	9,25	3,00	0,32	0,054
5.	ГСПУ 63/50 (бортовое), 1980-е	-	63	170	3,5	10,05	2,70	0,27	0,077
6.	СПУ (пр. 12883, бортовое), 1984	ОПА "Русь"	32	65	6,07	-	2,03	-	-
7.	СПУ (бортовое), 1980-е	ОПА	16	51,2	-	-	0,31	-	-
8.	СПУ (пр. 1846, шахтное), 1980-е	Батипост типа А	20	55,6	-	-	2,78	-	-
9.	Комплекс СПУ (пр. 1924, шахтное), 1981	Протяженные цилиндрические и сферические изделия	40	142	6,2	11,2	3,55	0,32	0,051
10.	СПУ 20-А1, А2, Б1, Б2 (шахтное), 1981	Батипост	20	-	-	-	-	-	-
11.	СПУ Nemesis (бортовое), 1990-е	Водолазный колокол	0,907	1,043	1,88	1,219	0,87	0,71	0,38
12.	СПУ Knuckle Boom Crane (кормовое), 1990-е	Водолазный колокол	100	-	-	-	-	-	-

Главными особенностями конструкций СПУ для спуска и подъема плавучих грузов на борт морского судна с учетом основных этапов процесса спуска-подъема [2] являются:

- колебание объекта на морском волнении после погружения в воду при спуске и до полного отрыва его от воды при подъеме;
- удары волн о корпус объекта во время его посадки на воду при спуске (от касания воды до образования слабины в канатной проводке) и во время подъема в воде от окончания выбирания слабины до полного отрыва от волн при подъеме на борт судна.

Особенности спуска и подъема объекта на морском волнении требуют решения задачи компенсации действия переменных возмущающих сил от волнения и перемещений точек крепления на СПУ грузовой канатной проводки, изменяющихся сил плавучести, инерционных сил, возникающих вследствие изменения кинетической энергии жидкости от присутствия в ней плавучего объекта, а также учета изменения его осадки при подъеме в воде (путем учета переменных присоединенных масс воды). При этом возникают значительные динамические нагрузки в грузовой канатной проводке, которые снижают амортизаторами и следящими системами, выбирающими слабины грузовых канатов при перемещениях плавучего объекта на волне.

Важными особенностями таких СПУ являются зависимость динамических усилий в канатной проводке (снижаются амортизаторами) и раскачивание объекта от качки судна (снижается креплением ветвями канатной проводки, подводимыми к объекту под углами).

В результате анализа конструкций и особенностей СПУ технических средств океанотехники (на примере подводных аппаратов и, в частности, ВК) следует отметить такие тенденции их развития:

- грузоподъемность СПУ достигла от 12 до 100 т;
- масса СПУ – 500 т и более (зависит от массы объекта спуска/подъема);
- максимальный вылет за борт от 2,7 до 6,2 м (для снижения вероятности ударов о борт судна объекта спуска/подъема от его раскачивания);
- высота над палубой от 7,51 до 16 м (зависит от высоты объекта спуска/подъема);
- наиболее применимое расположение СПУ по бортам судна-носителя (зависит от назначения судна и наличия свободного места на палубе);
- наибольшее распространение получили несущие металлоконструкции шарнирно-рычажного и параллелограмного типов.

Среди основных требований к конструкции СПУ с учетом воздействия морского волнения выделяют:

- необходимость снижения до допустимых пределов динамических нагрузок в грузовой канатной проводке как при отрыве плавучего объекта от волны, так и в процессе подъема на палубу судна (за счет работы следящей части устройства);
- уменьшение раскачивания плавучего объекта в процессе его перемещения за борт, спуска и подъема.

Оптимальным с точки зрения возникающих динамических нагрузок можно считать устройство СПУ с механизмом спуска и подъема, разделенным на грузовую и следящую части (которая обеспечивает выбирание слабины в канатной проводке).

Удельный показатель Δ (отношение грузоподъемности $P_{гр}$ к массе M СПУ) в зависимости от высоты СПУ над палубой судна-носителя H находится в диапазоне 2...5,5 (рис. 1, а, б): $M = 5,104 \cdot P_{гр} - 68,579$ – статистическая зависимость массы СПУ от его грузоподъемности; $\Delta = 0,2665 \cdot H + 0,5725$.

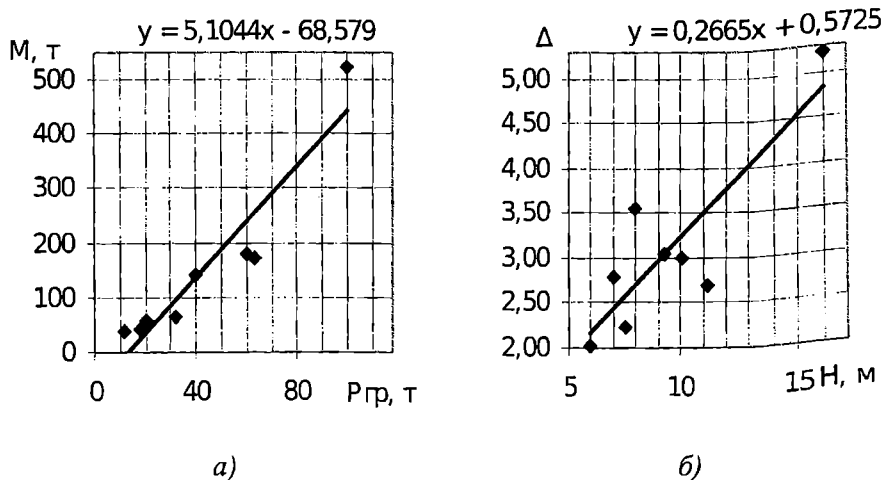
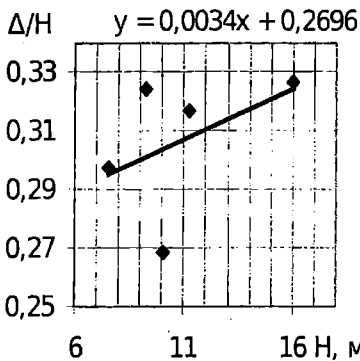


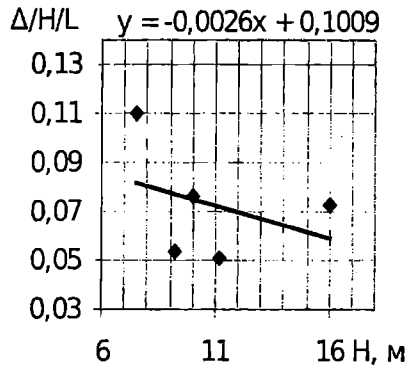
Рис. 1. Статистические зависимости для СПУ: а) $M = f_1(P_{гр})$; б) $\Delta = f_2(H)$

Отношение удельного показателя Δ к H примерно одинаково для рассматриваемых СПУ и не превышает 0,33 $\Delta/H = 0,0034 \cdot H + 0,2696$ (рис. 2, а), что подтверждает их соответствие современному техническому уровню и возможность анализа их конструкций в одной группе технических объектов. Удельный показатель $\Delta/H/L$ находится в диапазоне 0,051... 0,11 (рис. 2, б) $\Delta/H/L = -0,0026 \cdot H + 0,1009$.

Статистические зависимости массы СПУ от грузоподъемности, удельных показателей от высоты СПУ над палубой судна-носителя и вылета их за борт позволяют определить массы СПУ на стадии оценочных расчетов при проектировании судна-носителя.



a)



b)

Рис. 2. Статистические зависимости удельных показателей СПУ:
а) $\Delta/H=f_3(H)$; б) $\Delta/H/L=f_4(H)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаенко Б.А. Динамика судовых спускоподъемных операций. – К.: Наукова думка, 2004. – 320 с.
2. Васильев В.Ю., Крутиков А.В., Загорин В.В. Новое направление в использовании подводно-технических средств // Судостроение за рубежом. – 1990. – № 3. – С. 62-73.
3. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Регистр СССР. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.
4. Галь А.Ф., Дубина М.А. Анализ конструкций современных транспортировочных водолазных камер как объектов спускоподъема // Сб. научн. трудов НУК. – 2008. – № 1. – С. 65-73.

Надійшла 07.03.08

УДК 629.553

Г.В. Егоров
И.А. Ильницкий

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ СУХОГРУЗНЫЕ СУДА ДЕДВЕЙТОМ 7000 ТОНН ДЛЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Изложены принципы проектирования сухогрузных судов для Каспийского моря, включая выбор главных элементов, обоснование класса и классификационных ограничений. Дан пример реализации подходов, предлагаемых авторами при проектировании новой серии многоцелевых сухогрузных судов пр. RSD19. Серия строится на Волгоградском судостроительном заводе по проекту Морского Инженерного Бюро.

Ключевые слова: проектирование, сухогрузные суда ограниченных районов плавания, главные размеры, путевые условия, Каспийское море.

Целью настоящей статьи является обоснование основных характеристик сухогрузных судов, имеющих максимально возможный дедвейт по путевым ограничениям портов Каспийского моря и достаточные для круглогодичной эксплуатации на Каспии и вокруг Европы прочностные и мореходные качества. При этом предполагается, что суда должны иметь возможность перевозить навалочные и генеральные грузы, включая контейнеры, из портов Европы на порты Каспийского моря как через Волго-Балтийский водный путь (ВБВП), так и через Волго-Донской судоходный канал (ВДСК).

Как показано в [3], концепцию судна ограниченного района плавания полностью определяют грузовая база и путевые условия.

Грузовая база для судов каспийского региона (рис.1 из [8]) определяется особым географическим транзитным положением великого озера – моря и потребностями прикаспийских стран – России, Азербайджана, Казахстана, Ирана, Туркменистана и некоторых близлежащих стран – Грузии, Армении, Турции, Узбекистана, Омана, а также Индии, Афганистана, Пакистана [6].

Иранский импорт из Европы имеет своей конечной точкой доставки, как правило, столицу Тегеран, то с учетом того, что доставка грузов из портов Каспия автотранспортом значительно ближе (практически в четыре раза), чем из портов Персидского залива, этот грузопоток во многом может быть переориентирован именно на перевозки «каспийскими» судами.

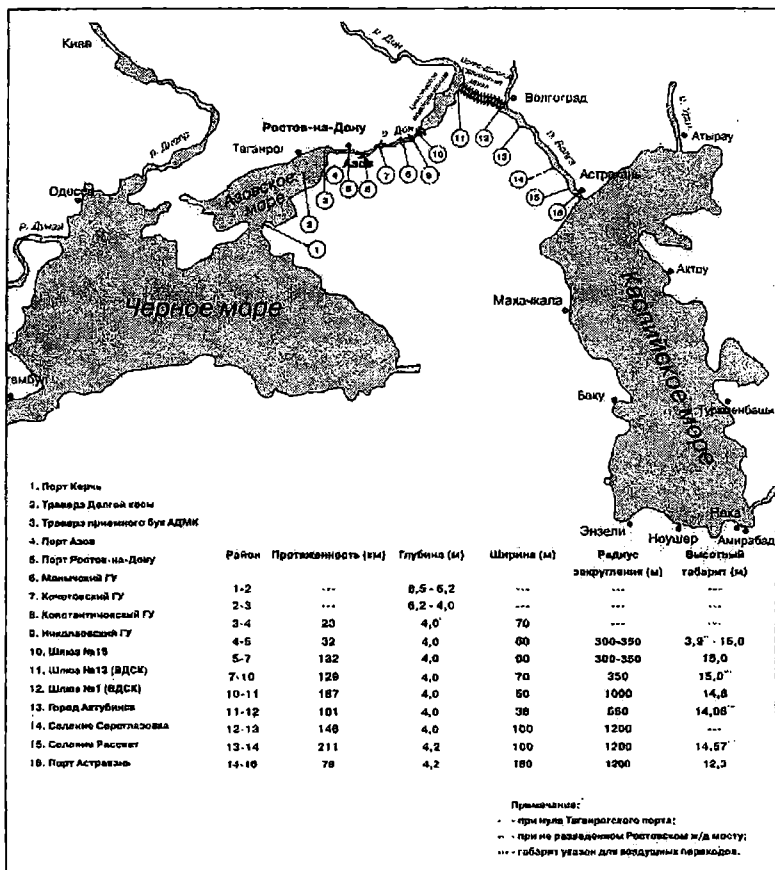


Рис. 1. Предполагаемый район эксплуатации судов

Кроме того, маршрут перевозок «Север-Юг» международных транзитных грузов из Индии и стран Персидского залива через Иран, Каспийское море, Россию в Европу в три раза короче, чем при использовании Суэцкого канала. Россия и страны СНГ импортируют чай, табак, фармацевтические и парфюмерные товары, кожгалантерею и другие изделия легкой промышленности. Экспорт в обратном направлении включает прокат черных металлов (главный груз), цветные металлы, лес, бумагу, целлюлозу, уголь, кокс, минеральные удобрения, продукты химической промышленности, оборудование для атомных и гидроэлектростанций. Например, доставка индийских товаров через Суэцкий канал до Москвы, где находятся основные консигнационные склады, занимает 45 суток, через Каспий – 30 суток [6].

До 1991 года через территорию СССР в направлении Ирана ежегодно перевозилось около 2,5 млн. тонн транзитных грузов. В 1983 году между двумя странами было перевезено 5 млн. тонн грузов (наивысшее

достижение), что составляло 45% внешнеторгового грузооборота Ирана (без учета нефти), в том числе 1,3 млн. тонн грузов двусторонней торговли и 3,7 млн. тонн транзитных грузов. В начале XXI века, по некоторым данным, годовой объем перевозок грузов из Западной Европы в Иран составил порядка 18 млн. тонн.

Для перевозки грузов в направлении вдоль Каспийского моря можно использовать только водный транспорт, так как на западном побережье железная дорога Баку – Джульфа – Тебриз – Тегеран не работает из-за войны в Карабахе, а на восточном побережье нет железнодорожного сообщения от Маката до Туркменбаши [6].

В табл. 1 представлены шесть конкурирующих схем доставки груза [9]:

1. Через Персидский Залив, Суэцкий канал и порт Одесса, затем перегрузка на железную дорогу и доставка по международному транспортному коридору (МТК) № 9 (Одесса – Киев – Москва – Санкт-Петербург – Хельсинки).

2. Через Персидский Залив, Суэцкий канал, Гибралтар, Балтийское море, затем перегрузка на железную дорогу и доставка по МТК № 9.

3. Через порт Бендер-Аббас (эта и последующие схемы предлагаются для индийского транзита), по коммуникациям Ирана до порта Амир-Абад, перегрузка на суда и затем по Каспийскому морю до порта Оля, перегрузка на железную дорогу и доставка по МТК № 9 и магистрали Москва – Волгоград – Астрахань.

4. Через порт Бендер-Аббас, по коммуникациям Ирана до порта Амир-Абад, перегрузка на суда и затем по Каспийскому морю до порта Махачкала, в порту Махачкала перегрузка на железную дорогу и доставка по МТК № 9, и магистралям Москва – Воронеж – Ростов-на-Дону, Ростов-на-Дону – Махачкала.

5. Через порт Бендер-Аббас, по коммуникациям Ирана, Туркменистана, Узбекистана, Казахстана и России (через Бафк, Тегеран, Фариман, Мешхед, Теджен, Чарджоу, Макат, Аксарайскую, Волгоград) с выходом на МТК № 9.

6. Через порт Бендер-Аббас, по коммуникациям Ирана, Туркменистана, Казахстана и России (через Бафк, Тегеран, Бендер-Торкман, Гудуролум, Гызылатрек, Туркменбаши, Ералиево, Макат, Аксарайскую, Волгоград) с выходом на МТК № 9 (предполагается строительство спрямляющей ж.-д. магистрали Ералиево – Туркменбаши и Гызылатрек – Гудуролум).

Варианты 3 и 4, в которых используются «каспийские» суда, выглядят существенно предпочтительней прочих.

Анализ фактических грузопотоков 2004-2007 годов показывает, что основным грузом, следующим из портов России на Иран, являются металлопрокат (до 85 % от общего объема), который применяется в каче-

Теория и проектирование судов

стве полуфабрикатов для иранской промышленности, а также лес, бумага и другие генеральные грузы в относительно небольшом количестве. Из Казахстана на Иран отмечаются поставки фуражного зерна.

Таблица 1

Сравнительная характеристика схем доставки грузов из Ирана и Индии в Россию и страны Северной Европы по данным [9]

Показатели:	СХЕМА					
	1	2	3	4	5	6
Бомбей – Москва						
Расстояние всего, км	9086	14262	6111	6525	8016	7341
в т.ч. - по морю	2330	13610	2750	2650	1820	1820
- по железной дороге	1356	652	3361	3875	6196	5521
время доставки, суток/часов	11/21	17/19	10/19	11/5	11/18	10/20
количество перегрузок в портах ¹⁾	1	1	3	3	1	1
количество пересекаемых таможенных границ	2	1	2	2	5	4
Бомбей – Хельсинки						
Расстояние всего, км	10125	13330	6554	6968	8459	2384
в т.ч. - по морю	2330	13330	2750	2650	1820	1820
- по железной дороге	2411	0/0	3804	4318	1624	5964
время доставки, суток/часов	13/2	17/9	11/7	11/17	12/6	11/8
количество перегрузок в портах ¹⁾	1	0	3	3	1	,
количество пересекаемых таможенных границ	3	1	3	3	6	5
Тегеран – Москва						
Расстояние всего, км	2955	15061	2892	3306	4247	4120
в т.ч. - по морю	7100	13010	930	830	0	0
- по железной дороге	2755	2011	1962	2476	4247	4120
время доставки, суток/часов	14/3	20/14	5/16	6/1	6/15	5/17
количество перегрузок в портах ¹⁾	2	2	2	2	0	0
количество пересекаемых таможенных границ	2	1	1	1	4	3
Тегеран – Хельсинки						
Расстояние всего, км	10950	14129	3297	4401	5892	5215
в т.ч. - по морю	7100	12730	930	830	0	0
- по железной дороге	3850	1399	3057	3571	5892	5215
время доставки, суток/часов	15/8	18/19	6/21	7/6	7/20	6/22
количество перегрузок в портах ¹⁾	1	1	2	2	0	0
количество пересекаемых таможенных границ	3	1	2	2	5	4

¹⁾ Без учета начальных и конечных пунктов

В порту Астрахань в 2006 году [7] было перегружено 2160,3 тыс. тонн металлопродукции, 339,1 тыс. тонн пиломатериалов, 87,4 тыс. тонн бумаги и 17,2 тыс. тонн зерна. Кроме того, в контейнерах было перевалено 97,4 тыс. тонн генеральных грузов. 94,5 % экспортных грузов были отправлены на порты Ирана.

На выбор главных размерений судна исследуемого типа влияют как путевые условия внутренних водных путей – ВДСК и реки Волга, так и условия морских портов и каналов Азовского моря, Керченского канала и самого Каспийского моря [4].

Основные каспийские порты – Астрахань, Махачкала, Баку, Актау, Атырау, Туркменбаши, Нека, Ноушехр, Энзели, Амир-Абад.

Иранские порты, которые могут перерабатывать сухие грузы – Ноушехр, Энзели, Амир-Абад, построены в искусственных акваториях, поэтому глубины в канале и у причалов в них обеспечивают осадку около 4,6 м и поддерживаются дноуглублением. В 2001 году объем перевозок сухогрузов через иранские каспийские порты достиг 4 млн. тонн. Многочисленные терминалы портов Астрахань, Оля и Бузан обеспечивают работу судов с осадкой 4,0-5,0 м с длинами причалов 140 м и более (за исключением причала «Юг-Терминал», длиной 108,5 м, «Снабженец», длиной 74,8 м и Астраханского зернового терминала длиной 115 м) [7]. Условия Волго-Каспийского канала, как правило, позволяют выходить в Каспийское море судам с осадкой до 4,5-4,6 м. Сводные результаты анализа данных путевых и портовых ограничений по максимально допускаемой габаритной длине L_M приведены в табл. 2, максимально допускаемой ширине

B_M – в табл. 3, осадкам d – в табл. 4, надводному габариту $H_{нг}$ – в табл. 5. На основе анализа путевых условий можно рекомендовать для «каспийского» судна габаритную длину 140 м, обеспечивающую возможность работы практически у всех причалов региона и прохождение всех «узких» мест ВДСК [1] без снижения скорости хода. Габаритная ширина судна может быть принята в пределах 16,8-17,0 м. Надводный габарит судна может быть равным 14,0 м или менее. Пересчет от L_M к значению длины судна по грузовую ватерлинию L может быть осуществлен с помощью соответствующих соотношений для различных длин СОРП нового поколения, приведенных в работе [3]. Аналогично, расчетная ширина судна может быть определена по формуле $B = B_M - b$, где b – суммарная ширина привального бруса, обычно 0,20...0,40 м. Рабочий диапазон осадок судна для каспийского моря находится в пределах 3,60...4,60 м.

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 технического задания скорости хода V_S оптимального значения коэффициента общей полноты C_b . Согласно рекомендаций [3] при скорости око-

ло $V_S = 10,5$ узлов $C_b = 0,90$. Максимально возможный дедейт судна обеспечивается рациональным конструированием связей корпуса, ведущим к минимизации его массы P_{mk} . Особую роль при этом играет обоснованное назначение класса по району плавания и ледовой категории.

Таблица 2

Путевые условия, влияющие на выбор габаритной длины L_M

Характеристика	Максимально возможное значение L_M
Полезная длина рабочей камеры шлюзов № 1 – № 15 ВДСК $L_{шк} = 145$ м	145 м (формально)
Минимальный радиус закругления судового хода реки Дон $R_{min} = 350$ м	$L_M \approx 160$ м при снижении скорости хода до 60% от полного хода и $L_M \approx 140...142$ м без снижения хода
Длины причалов $L_{пр} = 140..350$ м.	140 м
Ограничение Керчь – Еникальского канала по критерию круглосуточно-го прохода	160 м
Порт Темрюк	140 м

Таблица 3

Путевые условия, влияющие на выбор габаритной ширины B_M

Характеристика	Максимально возможное значение B_M
Полезная ширина камеры шлюзов ВДСК $B_{шк} = 17,8$ м	17,0 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 $B_{мс} = 110$ м	36,0 м

Таблица 4

Путевые условия, влияющие на выбор осадки d

Характеристика путей и портов	Максимально возможное значение d
ВДСК на порогах шлюзов	3,60 м
Астрахань, глубина у причалов $d_{\text{КАН}} = 4,0-4,9$ м	3,80-4,70 м
Иранские порты на Каспии, глубина у причалов	4,60 м
Волго-Каспийский канал, глубина судового хода	4,50 м
Ростов-на-Дону, глубина судового хода $d_{\text{ВВП}} = 4,0$ м	3,80 м
Азов, глубина судового хода $d_{\text{ВВП}} = 4,5$ м	4,30 м
Ейск, глубина судового хода $d_{\text{ВВП}} = 4,7$ м	4,50 м
Темрюк, глубина подходного канала $d_{\text{КАН}} = 4,4$ м	4,20 м
Таганрог, глубина у причалов $d_{\text{КАН}} = 4,2$ м	4,00 м
Кавказ, глубина у причалов $d_{\text{КАН}} = 5,0$ м	4,80 м
Мариуполь, глубина у причалов $d_{\text{КАН}} = 4,6-9,75$ м	4,40-9,30 м

Таблица 5

Путевые условия, влияющие на выбор надводного габарита $H_{\text{НГ}}$

Характеристика	Максимально возможное значение $H_{\text{НГ}}$
Воздушный переход, 3132,3 км, высота перехода $H_{\text{ЭП}} = 17,5$ м	14,0 м
Воздушный переход, 3155,4 км, высота перехода $H_{\text{ЭП}} = 23,6$ м	20,1 м
Автомобильный и железнодорожный мост, 3142,4 км, $H_{\text{МС}} = 19,7$ м	19,2 м

Назначение класса судна связано с фактическими условиями плавания, наблюдаемыми в предполагаемом районе [2].

По данным лоции Каспийского моря северная (российско-казахская) часть мелководна и представляет собой как бы отдельный бассейн, резко отличающийся от Среднего и Южного Каспия. Средняя глубина в северной части около 6 м, а наибольшие глубины, располагающиеся только вдали от берегов, не превышают 20-23 м.

В средней части Каспийского моря наиболее изрезан восточный берег. В него вдаются заливы Александра Бековича-Черкасского и Казахский. Западный берег до Апшеронского полуострова слабо изрезан, а берега Апшеронского полуострова образуют несколько приметных мысов, наиболее значительными из которых являются мысы Амбуранский и Килязинская коса. Средняя часть моря глубоководна. Наибольшая глубина средней части моря более 700 м. Берега южной части Каспийского моря, за исключением иранского побережья, изрезаны больше, чем берега его средней части. В южный берег Апшеронского полуострова вдается хорошо защищенная от северных ветров бухта Бакинская, а в восточный берег Южного Каспия вдаются Красноводский и Туркменский заливы. Много островов разбросано у восточного берега Апшеронского полуострова (Апшеронский архипелаг). Они расположены на расстоянии до 22 миль от береговой черты. В южной части моря к югу от бухты Бакинская тянется почти на 70 миль вдоль западного берега цепь островов Бакинского архипелага. У восточного берега южной части моря лежит узкий, вытянутый по меридиану, остров Огурчинский. Южная часть моря наиболее глубоководна, особенно южный берег.

Перечень и надежность мест убежищ Каспийского моря, а также расстояния между ними, представлены в табл. 6. Как видно из таблицы, наибольшее расстояние между местами-убежищами составляет:

- вдоль восточного побережья – 112 миль (между Туркменским заливом и Гасан-Кулийским рейдом);
- вдоль южного побережья – 128 миль (между п. Ноушехр и п. Энзели);
- вдоль западного побережья – 92 мили (между Сальянским рейдом и п. Баку).

Как отмечается в [2], Каспийское море является довольно бурным, особенно в средней его части. В Северном Каспии развитие волнения ограничивается мелководьем, а с декабря по май – наличием льдов. Поэтому здесь не бывает волн высотой более 4 м. В Среднем и Южном I районах Каспийского моря примерно каждые пять лет высоты волн могут превышать 10 м, повторяемость волнения ≥ 6 м составляет 0.1-0.6 %. Наиболее беспокойный район моря – Нефтяные Камни и акватория к северо-западу от них. Здесь высоты волн могут достигать 12 м. Почти во всех районах моря большие волны наблюдаются при ветрах северных направлений, только на северо-западе Среднего Каспия наибольшие высоты волн наблюдаются при южных и юго-западных ветрах. Чаще всего на море отмечается волнение высотой до 2 м.

В табл. 6, 7, 8 представлены значения вероятностей возникновения режимов волнения $p_h^{\text{дон}}(h_{3\%}^{\text{дон}})$ для допускаемых высот волн 3% обеспеченности $h_{3\%}^{\text{дон}}$ по каждому классу судов.

Таблица 6

Места – убежища Каспийского моря

Но- мер	Наименование убежища	Расстояние между убежищами, мили		Навигационная ситуация	Направление ветра							Примечание						
		Основными	Основным и дополнительн.		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З		СЗ					
0	Астраханский рейд	0	0	Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Восточный берег																		
1	Порт Баутино	90		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Внутренний рейд – для судов с осадкой до 5 м. Внешний рейд открыт ветрам от С.
2	Мангышакский залив	28		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
3	Порт Актау	77		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	При сильных СЗ ветрах суда уходят в за- лив Александра Бековича-Черкаского
4	Зал. Александра Бековича-Черкаского	68		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
5	Казахский залив: якорное место у Кендырлийской косы	57		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Якорное место с глубиной 4,5 м
6	Якорное место у мыса Кумак	10		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Якорное место с глубинами 5 – 7 м.
7	Бухта Бекдаш	100		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Вход в бухту по каналу глубиной 5,5 м, шириной 100 м. Вход при большом волне- нии с моря затруднителен, а для судов с предельной осадкой – опасен
8	Бухточка Керши	65		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Стоянка судов с осадкой до 4 м
9	Залив Красноводский и порт Туркменбаши	49		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	В заливе плавание по каналам и фарватеру с минимальной глубиной 4,6 м. Глубины на внутреннем рейде 3,8 – 4,8 м

Продолжение табл. 6

№	Наименование убежища	Расстояние между убежищами, миль		Навигационная ситуация	Направление ветра							Примечание		
		Основными	Основным и дополнительным		С	СВ	В	ЮВ	ЮЗ	З	СЗ			
10	Туркменский залив, западный и восточный берега острова Огурчинский	110		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Южный берег														
11	Рейд Гасан-Кулийский	112		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Глубины на рейде в 4 милях от берега около 4 м.
12	Бендер-Шакский рейд	28		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Глубины на рейде 4 – 7 м
13	Порт Амирабад	30		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
14	Порт Нека	10		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Акватория порта ограничена
15	Порт Ноушехр	92		Вход Стоянка	-	-	+	+	+	+	+	+	+	При ветрах северной половины горизонта стоять на рейде невозможно
16	Порт Эззели	128		Вход Стоянка	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Рейд у устья р. Ленгеруд	58		Вход Стоянка	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Рейд у устья р. Сефидруд	43		Вход Стоянка	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Якорные места у мыса Керган-руд	40		Вход Стоянка	+	+	-	-	+	+	+	+	+	Стоянка на якорных местах из-за мелководья относительно надежна
17	Рейд у города Иранская Астара	75		Вход Стоянка	+	+	-	-	+	+	+	+	+	
Западный берег														
18	Сальянский рейд	43		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Саринский рейд	62		Вход Стоянка	+	+	-	-	+	+	+	+	+	
19	Порт Баку и его рейды	92		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
20	Якорные места вокруг Алшеронского полуострова	68		Вход Стоянка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Совместно обеспечивают укрытие от ветров всех направлений

Теория и проектирование судов

Условие $p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}}) < p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}})$, где $p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}})$ определяет максимально допустимые значения вероятностей, которые соответствуют разрешенному классу в данном районе, при условии удовлетворения требований к удаленности судна от мест убежищ.

Для класса ПСП принимается $p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}}) = 6\%$, для ПСП $p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}}) = 10\%$. По сути, величина $p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}})$ характеризует допускаемый уровень простоев судна в ожидании погоды.

Полученные данные свидетельствуют, что по ветро-волновой обстановке в Каспии могут быть допущены к регулярной работе суда с классами ПСП при $h_{3\%}^{\text{доп}} = 3,5$ м.

Однако проведенный анализ положения мест-убежищ и их надежности при различных направлениях ветра позволяет сделать вывод о том, что для новых судов следует использовать класс не ниже II, так как расстояние между убежищами превышает 100 миль.

Таблица 7

Вероятность режимов волнения для Северного Каспия

Район плавания, $h_{3\%}^{\text{доп}}$	$p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}})$, %				
	Весна	Лето	Осень	Зима	За год
ПСП (6,0)	1,0	0,6	0,2	Лед	0,6
ПСП (4,5)	2,9	1,9	0,7	Лед	1,8
ПСП (3,5)	6,0	5,2	1,9	Лед	4,3
ПСП (2,5)	15,8	14,3	7,4	Лед	12,4
III (2,0)	26,9	24,7	15,4	лед	22,3

Таблица 8

Вероятность режимов волнения для Среднего Каспия

Район плавания, $h_{3\%}^{\text{доп}}$	$p_h^{\text{доп}}(h_{3\%}^{\text{доп}})$, %				
	Весна	Лето	Осень	Зима	За год
ПСП (6,0)	0,3	0,4	0,7	0,7	0,4
ПСП (4,5)	1,7	1,1	2,4	2,4	1,8
ПСП (3,5)	4,3	2,7	5,9	5,8	4,7
ПСП (2,5)	11,7	9,7	17,4	17,7	14,2
III (2,0)	21,2	19,3	29,7	30,3	25,2

Вероятность режимов волнения для Южного Каспия

Район плавания, $h_{3\%}^{\text{доп}}$	$\rho_h^{\text{доп}} (h_{3\%}^{\text{доп}})$, %				
	Весна	Лето	Осень	Зима	За год
ПСП (6,0)	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1
ПСП (4,5)	0,9	0,4	0,9	0,9	0,7
ШСП (3,5)	2,2	1,7	2,3	2,4	2,2
ШСП (2,5)	7,1	4,4	8,3	10,3	7,6
Ш (2,0)	14,1	10,3	17,1	20,3	15,3

Как правило, в качестве «каспийских» судов в настоящее время выступают суда смешанного река-море плавания традиционного типа с классами ШСП (М-СП) и ПСП (типа «Волго-Балт» проектов 2-95, 2-95А/Р, типа «Сормовский» проектов 1557, 613, 488АМ, типа «Амур» проектов 92-13/040, типа «Волго-Дон»/«Волжский» проектов 1565, 05074М), спроектированные или модернизированные для работы на осадках около 3,60...4,00 м.

15 февраля 2007 г. Волгоградский судостроительный завод сдал заказчику головное судно «Iran Anzali» серии типа «Хазар» (рис. 2). «Iran Anzali» это многоцелевой сухогрузный теплоход смешанного река-море плавания дедвейтом 7004 т относящийся к классу судов «Волго-Дон макс», предназначенный как для эксплуатации в Каспийском море, так и вокруг Европы с возможностью прохода по Волго-Донскому судоходному каналу (ВДСК) – первое «каспийское» судно нового поколения. Серия судов строится по заказу судоходной компании «Khazar Sea Shipping Lines». Проект судна (обозначение проекта RSD19) разработан Морским Инженерным Бюро (г. Одесса) с учетом специальных требований Заказчика к условиям эксплуатации судна на Каспийском море и для транзита, а также при необходимости для работы на европейских перевозках.

Судно первого ограниченного района плавания (СОРП) предназначено для транспортировки генеральных, навалочных, лесных, зерновых и крупногабаритных грузов, контейнеров международного стандарта высотой 8,5 и 9 футов и опасных грузов классов 1.4S, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 МК МПОГ и Приложения В Кодекса ВС.

Эксплуатация предусматривается на внутренних водных путях (ВВП) европейской части Российской Федерации с проходом ВДСК, а также в морских районах в соответствии с классом судна, включая эксплуатацию вокруг Европы, работу на линиях порты Европы – Каспий, порты Азовского и Черного моря – континент и др.

Выбор I района был связан с решением заказчика на практически «неограниченную» эксплуатацию судна в условиях европейского каботажа.

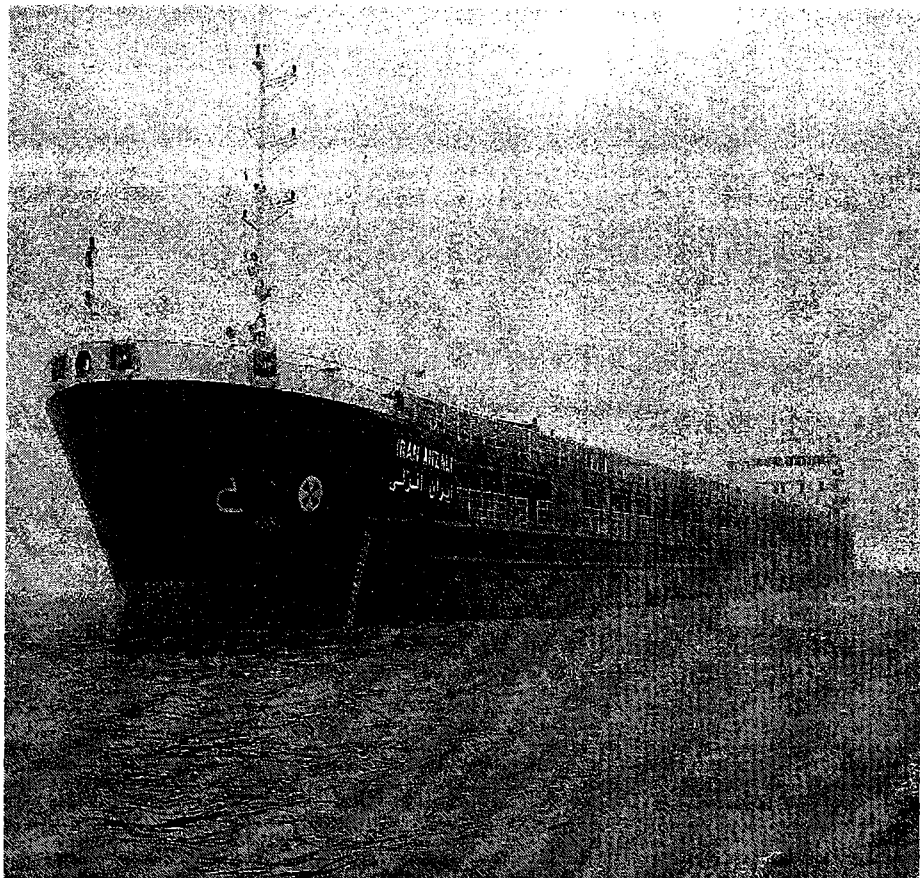


Рис. 2. Судно «Iran Anzali» на ходовых испытаниях

Проект судна разработан на класс КМ \odot ЛУ2 \square I A1 Российского Морского Регистра Судоходства (РС) и удовлетворяет всем требованиям международных конвенций, действующим на дату закладки судна.

Поскольку Заказчиком была определена эксплуатация судна преимущественно в морских условиях и в меньшей степени по внутренним водным путям (ВВП), судно спроектировано на более высокий район плавания и ледовую категорию, чем большинство судов класса «Волго-Дон макс».

Созданию проекта сухогрузного судна предшествовал технико-экономический анализ (см. табл. 10) наиболее эффективных из существующих СОРП (пр. 1557 типа «Сормовский», пр. 19610 типа «Волга», пр. 15881 типа «Профессор Бубнов»), реклассифицированных и модернизированных до уровня требований класса РС ПСП из речных судов (пр. 05074М типа «Волжский», пр. 0225 «Сибирский», пр. 1743 типа «Омский») и новых проектов, таких как пр. 00101 типа «Русич» имеющих аналогичный класс РС.

Таблица 10

Характеристика	Пр. RSD19 «Iran Anzali»	Пр. 006RSD05 «Гейдер Алиев»	Пр. 00101 «Русич»	Пр. 15881 «Профессор Бубинов»	Пр. 19610 «Волга»	Пр. 05074M «Волжский-43»	Пр. 0225 «Сибирский»	Пр. 1557 «Сормовский»
Класс судна	КМ ⚓ ЛУ2 1 1 А1	КМ ⚓ ЛУ1 1 1 А1	КМ ⚓ ЛУ2 1 1 А1	КМ ⚓ Л2 1 А2 1 при d ≤ 5,0 м	КМ ⚓ Л3 1 1 А2	КМ ⚓ Л4 II СП, при постройке +0- ПР 2,0.	КМ ⚓ Л3 II СП, при постройке +М-СП 3,5	КМ ⚓ Л4 1 ПСП
Длина наибольшая, м	139,95	139,63	128,20	124,40	140,00	138,30	129,50	114,02
Длина между перпендикулярами, м	135,69	134,00	122,80	117,00	134,00	135,00	122,00	110,15
Ширина габаритная, м	16,70	16,70	16,70	16,60	16,56	16,70	15,80	13,20
Ширина, м	16,50	16,50	16,50	16,46	16,40	16,50	15,60	13,00
Высота борта, м	6,00	6,00	6,10	7,50	6,70	5,50	6,00	5,50
Осадка по ЛГВЛ, м	4,60	4,60	4,20	5,926	4,677	3,754	3,906	3,81
Высота габаритная от ОП до верха несъемных частей, м	17,20	16,20	16,80	-	16,40	16,00	15,60	16,40
Кубический модуль, LbH	14023	13991	13091	15488	15533	12703	12277	8278
Валовая вместимость, GT	5676	5687	4960	4724	4991	5076	3743	2434
Чистая вместимость, NT	3109	3240	2140	1959	1781	2299	1123	994
Объем грузовых трюмов (по нижней кромке люковых закрываний), м³	10956	11408	8090	6800	6864	9358	5431	4297
Количество грузовых трюмов	4	4	3	4	4	4	4	4
Контейнероустойчивость всего / в трюмах, TEU	274 / 204	274 / 204	267 / 180	165 / 111	144 / 92	-	192 / 96	-
Количество, мощность (кВт) и тип главных двигателей	2x1200 Wartsila 6L20	2x1120 Wartsila 6L20	2x1140 Wartsila 6L20	2x1103 6ЧРП 36/45	2x970 8NVDs 48A-3U	2x883 6ЧРН 36/45 (Г70)	2x662 Г-70-5	2x485 6NVD-48AU
Скорость при осадке по ЛГВЛ, узл при % от МДМ	11,9 (85%)	11,8 (100%)	11,0 (90%)	12,4 (100%)	10,0 (100%)	10,2 (100%)	10,0 (100%)	10,4 (100%)
Двигательно-рулевой комплекс	2 винта в насадках + 2 руля	2 ВРК SCHOTTTEL SRP 1010FP	2 винта + 2 руля	2 ВФШ 2 руля	2 ВФШ в поворотных насадках + 1 руль	2 ВФШ в поворотных насадках	2 ВФШ	2 винта в насадках + двоясный руль
Мощность вспомогательных ДГ, кВт	2x240	2x215	3x160	3x200	3x150	2x114	3x110	3x80
Мощность аварийного ДГ, кВт	1x136	1x145	1x85	1x75	1x100	1x50	1x58	1x30

Продолжение табл. 10

Характеристика	Пр. RSD19 «Ган Апп- зап»	Пр. 006RSD05 «Гейдар Алиев»	Пр. 00101 «Русич»	Пр. 15881 «Профессор Бубнов»	Пр. 19610 «Волга»	Пр. 05074М «Волжский-43»	Пр. 0225 «Сибирский»	Пр. 1557 «Сормовский»
Мощность подвинувающего устройства, кВт	200	230	160	-	135	95	есть	-
Автономность, сут.	20	15	20	30	20	15	15	10
Экипаж/количество мест	13 / 16	12 / 14	10 / 12	23 / 25	18	16	14 / 16	20
Вес судна, порожнем, т	2653	2610	2660	3120	2710	2090	2120	1270
В море при осадке по ЛПВЛ								
Дедвейт, т	7004	6970	5190	5756	6207	4743	3353	3174
Спецификационный УПО груза, м ³ /т	1,68	1,71	1,63	1,28	1,18	1,19	1,34	1,44
Коэффициент использования водоизмещения по дедвейту	0,725	0,727	0,687	0,648	0,696	0,692	0,725	0,725
Энергозатраты на единицу транспортной производительности, мощности (дедвейт х скорость), кВт/т·узл	0,0287	0,0306	0,0399	0,0309	0,0313	0,0279	0,0278	0,0312
В море (осадка 4,20 м)								
Дедвейт, т	6108	6084	5190	2883	5216	-	-	-
Спецификационный УПО груза, м ³ /т	1,95	1,98	1,63	2,77	1,42	-	-	-
Коэффициент использования водоизмещения по дедвейту	0,697	0,679	0,687	0,480	0,658	-	-	-
В реке (осадка 3,60 м)								
Дедвейт, т	4596	4580	3855	1815	3825	4007	2970	-
Спецификационный УПО груза, м ³ /т	2,51	2,61	2,15	4,25	1,89	1,41	1,52	-
Коэффициент использования водоизмещения по дедвейту	0,634	0,637	0,620	0,368	0,585	0,654	0,700	-
В реке (осадка 3,40 м)								
Дедвейт, т	4167	4153	3430	1513	3429	3638	2714	-
Спецификационный УПО груза, м ³ /т	2,79	2,89	2,42	5,23	2,12	1,56	1,67	-
Коэффициент использования водоизмещения по дедвейту	0,611	0,614	0,592	0,327	0,559	0,632	0,681	-

При анализе существующих судов учитывались их характеристики после повышения грузоподъемности и модернизации по проектам МИБ. Так, по проекту 05074М приведены данные для судна «Волжский 43» после модернизации путем подъема комингсов грузовых люков до 2,5 м.

Суда проектов 19610 и 15881 при осадках 3,40-3,60 м для прохода ВДСК имеют совершенно недостаточную грузоподъемность для перевозок река-море. Кроме того, грузовместимость их трюмов не позволяют полностью использовать грузоподъемность при перевозках грузов легкой угля, а спецификационный удельно-погрузочный объем (УПО) составляет 1,18-1,28 м³/т, что существенно снижает эффективность их использования в море.

При эксплуатации через ВДСК наилучшие относительные характеристики по грузоподъемности имеют реклассифицированные суда проекта 1743, а также суда пр.1557, строившиеся на класс ПСП, а абсолютные – суда проекта 05074М.

При этом спецификационный УПО судов пр.1557 и 1743 в море составляет около 1,34-1,44 м³/т, что недостаточно при перевозках некоторых сортов зерна, семечки, металлолома, хлопка и ряда других достаточно распространенных грузов.

В целом, из существующих судов наилучшие технико-экономические показатели имеет модернизированный проект 05074М с поднятыми комингсами.

В работе [3] уже отмечались основные недостатки существующих реклассифицированных судов, равно как и черты, привлекающие судовладельцев. К первым, безусловно, относится ограниченная надежность конструкций, высокий уровень риска повреждений корпусов, а также значительный возраст, ко вторым – их экономическая эффективность. Последнее обстоятельство в немалой степени обусловлено большой полнотой обводов и малыми в, сравнении с морскими судами, скоростями хода, благодаря чему двигатели имеют невысокую мощность и низкий расход топлива на ходу.

В качестве прототипа для проекта RSD19 был принят показавший хорошие результаты проект сухогрузного 006RSD05 (суда типа «Гейдар Алиев»), спроектированный ранее Морским Инженерным Бюро. Была поставлена задача для проекта RSD19 при повышении требований к району плавания (увеличение с ограниченного района II до ограниченного I) и ледовой категории (с ЛУ1 до ЛУ2) добиться максимально возможного дедвейта при сохранении ограничений габаритов судна для прохода ВДСК и улучшения пропульсивных качеств.

В связи с тем, что эксплуатировать судно предполагается преимущественно в море и в меньшей степени на ВВП, вместо винторулевых колонок (ВРК), как у проекта 006RSD05, в проекте RSD19 применена традиционная двухвальная движительная установка с винтами фиксирован-

ного шага (ВФШ) в неповоротных направляющих насадках и 2 подвесных балансирных руля, расположенных непосредственно за гребными винтами.

Преимущества ВРК в улучшении маневренных качеств и упрощении управления судном, упрощении монтажа и эксплуатации пропульсивного комплекса, возможности их монтажа и демонтажа на плаву в данном случае не перевесили преимуществ традиционного решения из-за пониженного КПД гребных винтов ВРК (вследствие ограниченности их диаметра) и более низких требований к маневренности судна и технологичности монтажа.

В связи с отказом от ВРК в пользу двухвальной установки с ВФШ в насадках и необходимости повышения КПД пропульсивного комплекса перед проектантом встала задача размещения винтов оптимального диаметра в условиях ограниченной осадки судна, высокого значения отношения ширины судна к осадке и значительного коэффициента общей полноты, характерных для судов класса «Волго-Дон макс».

Традиционный путь решения подобных задач связан с проведением обширных модельных экспериментов в опытовом бассейне с целью отработки обводов кормовой оконечности судна и взаимодействия элементов движительно-рулевого комплекса (ДРК). Однако, ввиду предельно коротких сроков проектирования, характерных для современного судостроения, проведение предварительных модельных экспериментов в опытовом бассейне становится невозможным. Выходом из сложившегося положения оказалась возможность выполнения необходимых проработок с использованием современных методов вычислительной гидродинамики, предложенных специалистами Digital Marine Technology (DMT). Методы вычислительной гидродинамики, реализованные в комплексе программ инженерного анализа, позволяют определять полную картину потока, обтекающего корпус судна, на начальных стадиях проектирования, решать задачи оптимизации формы корпуса и конфигурации выступающих частей.

В рамках создания проекта RSD19 основные мероприятия по оптимизации гидродинамических качеств были связаны с разработкой обводов кормовой оконечности судна. Носовая оконечность, спроектированная ранее также с применением численных методов гидродинамики для судна проекта 006RSD05, была оставлена без изменений.

Исходя из оптимального коэффициента нагрузки по мощности, для судна были определены диаметры гребных винтов в направляющих насадках и общая конфигурация ДРК. В отличие от судов с ВРК, увеличенный диаметр гребных винтов потребовал применения кормовых полутоннелей.

Форма полутоннелей и кормовой оконечности (рис. 3) в целом была отработана путем последовательных корректировок вариантов по результатам численных расчетов. Большую роль в выборе формы тоннелей сыграло изучение линий тока по корпусу судна. В итоге линии тока

показали двумерный характер обтекания судна с $V/T = 3,59$ т.е. на практике рассматривалась так называемая «батоксная схема» обтекания.

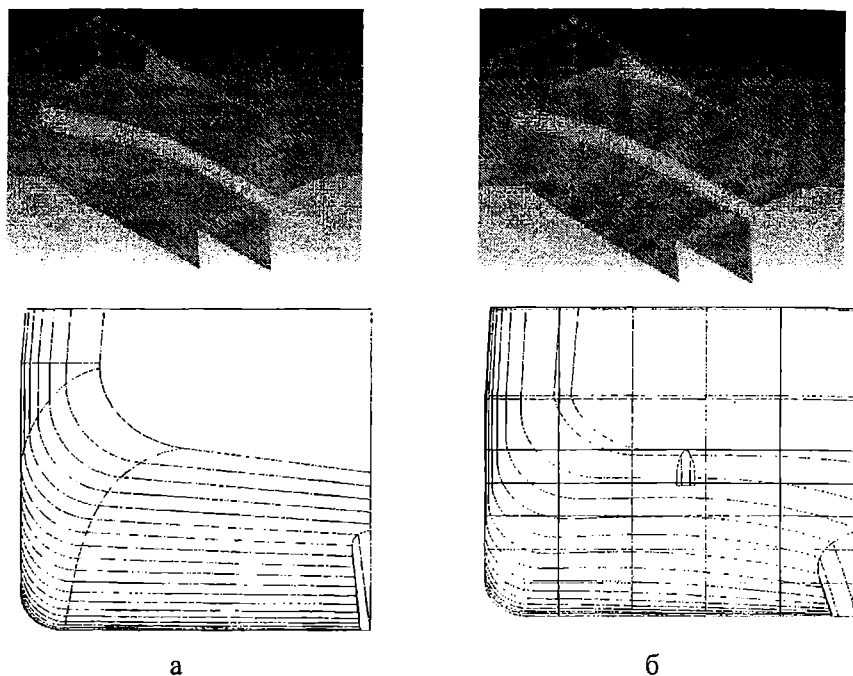


Рис. 3. Кормовая оконечность судна:
а – с ВПК (проект 006RSD05); б – с полутоннелями

Следует отметить, что режим движения судна, проектируемого на скорости хода 10-11 узлов (в данном случае $Fr = 0,14-0,16$), в значительной степени отличается от режимов с развитым носовым сопротивлением, характерным для большинства морских судов. По этим причинам факторы, обуславливающие величины основных составляющих полного сопротивления, связаны, главным образом, с вязкостными явлениями.

Учитывая полноту обводов и ограниченную осадку судна, для обеспечения хороших ходовых качеств особенно важно избежать развитого пограничного слоя в кормовой оконечности и высоких скоростей попутного потока в районе установки гребных винтов. В связи с этим при отработке формы кормовых обводов тщательно отслеживалась картина распределения касательных напряжений по поверхности корпуса, позволяющая судить об отрывных явлениях.

Использование методов вычислительной гидродинамики позволило сократить время разработки оптимизированной формы корпуса, выступающих частей, получить расчетные данные о буксировочном сопро-

тивлении судна в интересующем диапазоне скоростей хода и прогноз скорости хода. На последующих этапах параллельно разработке проекта судна по желанию Заказчика с целью проверки полученных расчетных данных были выполнены буксировочные и самоходные испытания модели судна (рис. 4) в большом опытовом бассейне ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова под руководством профессора Г.И. Каневского [5].

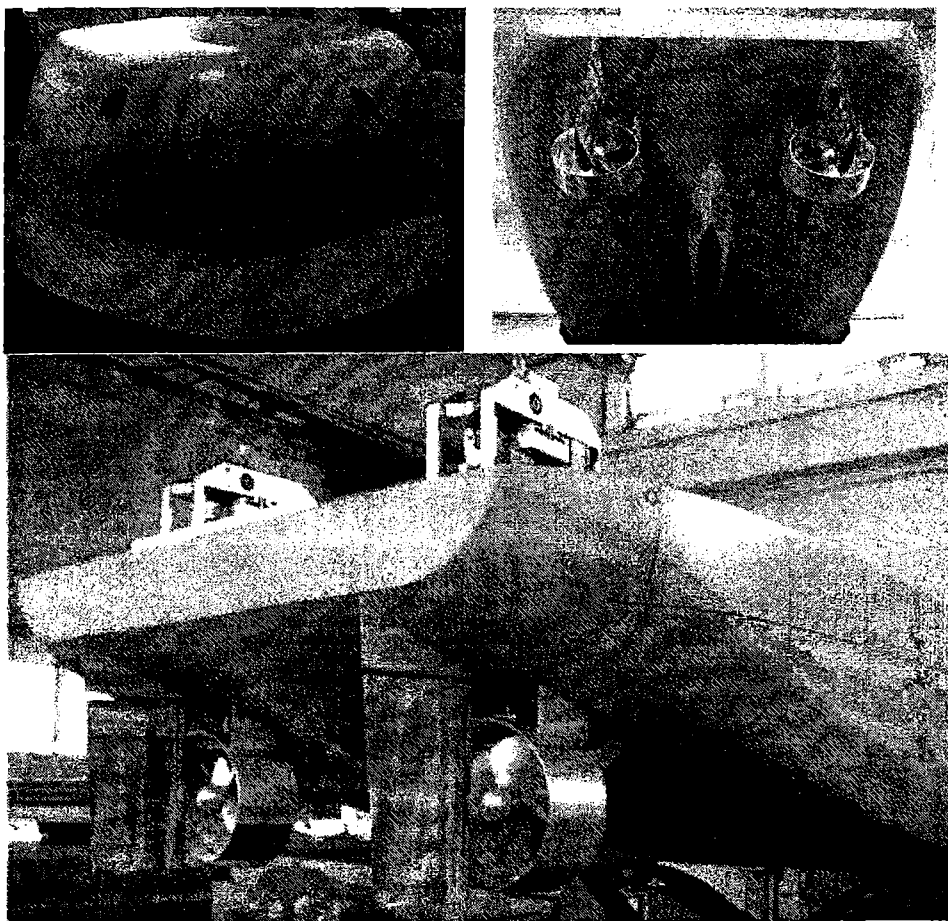


Рис. 4. Самоходная модель судна пр. RSD19, выполненная в ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова

При сравнении экспериментальных результатов с расчетными (табл. 11) очевидны их незначительные различия, уровень которых не превышает погрешностей эксперимента в современных гидродинамических лабораториях, оборудованных крупными опытными бассейнами. Можно также отметить, что схема окраски корпуса оказывает весьма небольшое влияние на величину полного сопротивления судна.

Сравнение результатов определения полного сопротивления
теоретического корпуса судна проекта RSD19

V _с , узл.	Полное сопротивление R _t , кН		
	ЦНИИ Крылова, корпус с учетом окраски SPC	DMT, свежеокрашенный корпус	DMT, корпус с учетом окраски SPC
1	2	3	4
8,0	75,3	74,56	72,74
9,5	107,5	111,04	108,19
10,5	137,2	138,94	137,08
11,5	179,2	177,03	176,54
12,5	234,3	234,84	229,11

Для полной корректности сравнения, необходимо учесть, что специалисты ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова при пересчете результатов модельных испытаний приняли величину корреляционной надбавки к коэффициенту полного сопротивления с учетом окраски подводной поверхности корпуса самополирующимся покрытием (SPC) и по условию полного штиля (надбавка составила 0,09 x 10⁻³). Специалисты DMT в своих расчетах использовали надбавку [10], рекомендованную для средних условий испытаний.

Сопоставление выглядит для численного метода тем более благоприятным, хотя явления, сопровождающие движение данного типа судов, отличаются значительной сложностью. Несмотря на низкие числа Фруда и связанное с этим небольшое влияние волнового сопротивления, большая полнота и неклассические соотношения главных размерений обуславливают мощное вихреобразование и отрывы пограничного слоя.

Расчет статистическим методом, несмотря на тщательно подготовленные данные о геометрических характеристиках корпуса, определил полное сопротивление судна с заметной погрешностью (рис. 5).

В итоге концепция судна была сформулирована следующим образом: сухогрузное судно с полным использованием габаритов ВДСК, максимально возможным для заданной скорости коэффициентом общей полноты (около 0,90), повышенной грузоподъемностью при минимально возможной высоте борта; с традиционной двухвальной движительной установкой с ВФШ в неповоротных направляющих насадках, 2 рулями, расположенными непосредственно за гребными винтами; обоснованной эксплуатационной надежностью конструкций судового корпуса при оптимальной металлоемкости последнего.

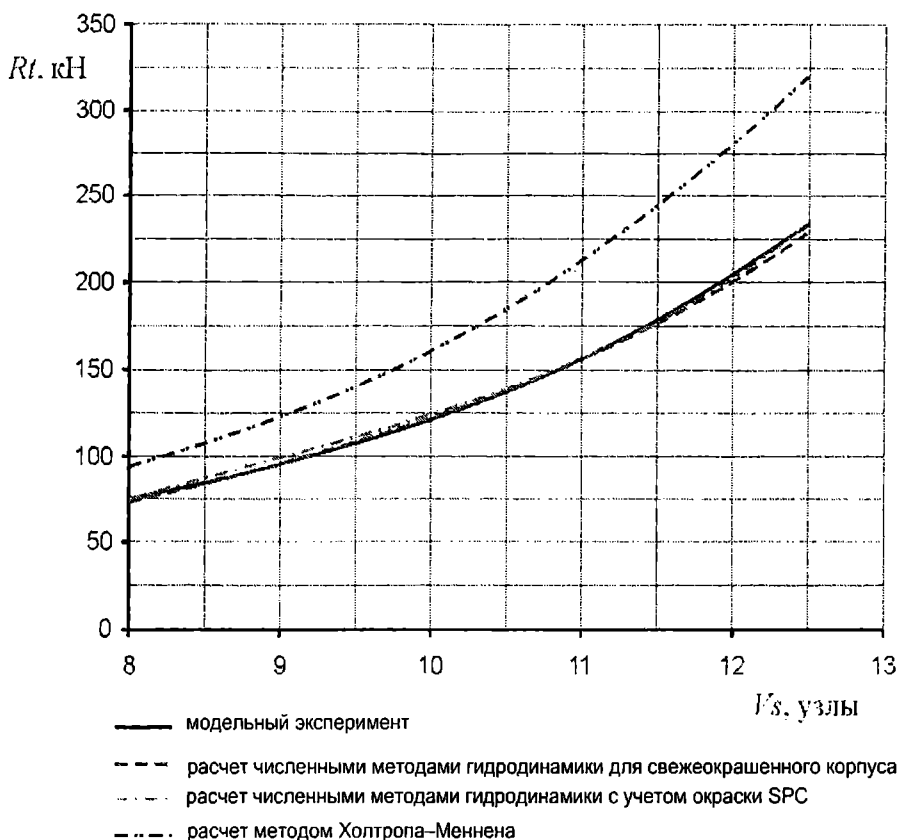


Рис. 5. Сопоставление полного сопротивления судна пр. RSD19

Увеличение высоты грузового пространства позволяет повысить общую продольную прочность за счет увеличения расстояния между крайними связями эквивалентного бруса. Более рациональное распределение материала, в свою очередь, приводит к незначительному повышению металлоемкости при существенном увеличении момента сопротивления эквивалентного бруса (рис. 6, 7), аналогично тому, что было выполнено при модернизации судов проекта 05074М.

Архитектурно-конструктивный тип судна – стальной однопалубный двухвинтовой теплоход, с баком и ютом, с кормовым расположением рубки и машинного отделения, с двойным дном высотой 980 мм, двойным бортом шириной 1900 мм, четырьмя трюмами, с бульбовой носовой и транцевой кормовой оконечностями (рис. 8).

В носовой оконечности с высоким для данного типов судов баком расположены форпик, аварийный пожарный насос, шахта лага и эхолота, шкиперская, малярная, а также носовое подруливающее устройство типа «винт в трубе» мощностью 200 кВт.

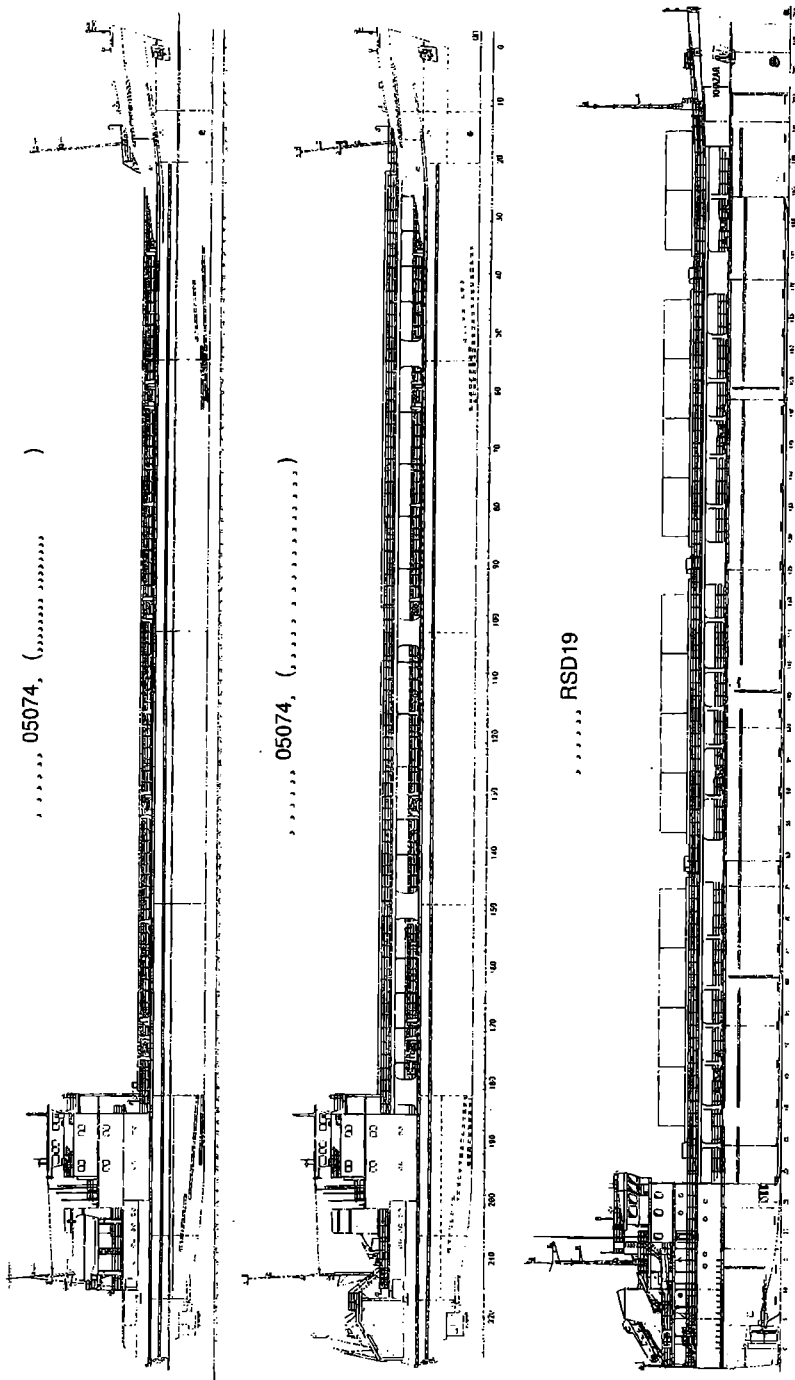


Рис. 6. Сравнение боковых видов судов класса «Волго-Дон макс»

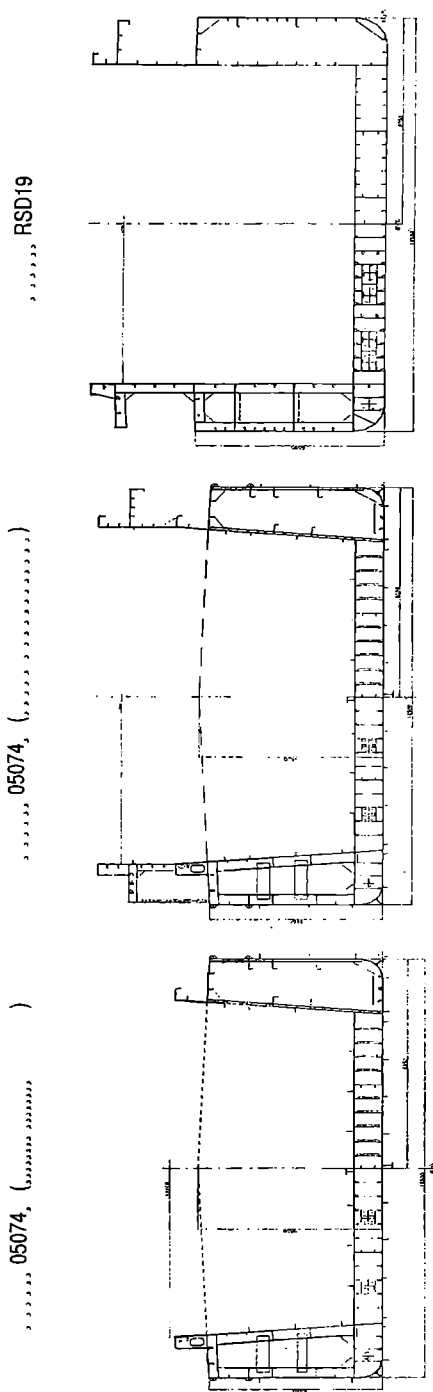


Рис. 7. Схемы мидель-шпангоута судов класса «Волго-Дон макс» и проекта RSD19

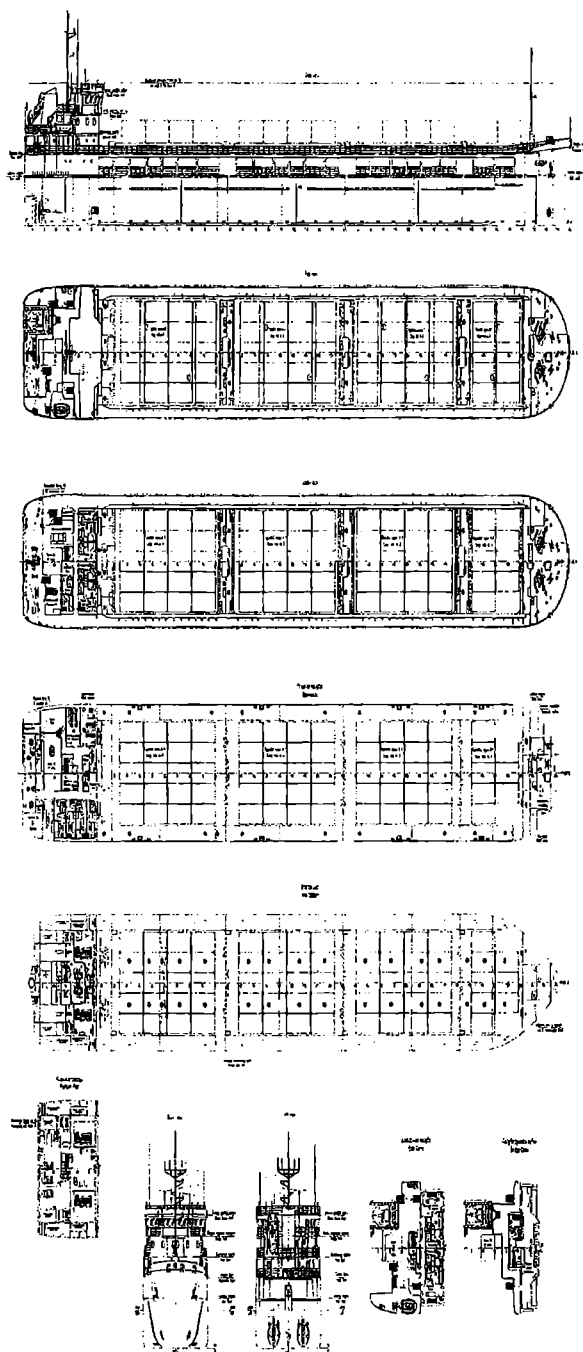


Рис. 8. Общее расположение судна пр. RSD19

В кормовой оконечности судна расположены МО и развитая высокая надстройка юта. Трехъярусная кормовая рубка со служебными и жилыми помещениями для экипажа численностью 13 чел. (16 мест) спроектирована с учетом обеспечения ограниченного надводного габарита судна (14,2 м при осадке 3,00 м). Рулевая рубка выполнена с круговым обзором и минимальными зонами затенения в соответствии с ISO 8468 и циркулярным письмом MSC/Circ.982 от 5 декабря 2000 г.

Все трюма ящичной формы, гладкостенные, удобные для проведения грузовых работ и размещения груза без штивки. Размеры грузовых трюмов 29,9 x 12,7 м (трюма №2, 3, 4) и 15,6 x 12,7 м (трюм № 1) при высоте 8,4 м, которая гарантирует размещение трех ярусов контейнеров высотой 9 футов.

Грузовые трюма оборудованы складывающимися люковыми закрытиями, обеспечивающими 100 %-е раскрытие трюмов. Расчетная нагрузка на люковые крышки в соответствии с требованиями МК66 с учетом резолюции ИМО MSC.143(77) составляет для люка № 1, носовой секции люка № 2 – 3,5 т/м² и 2,60 т/м² для трюмов № 2, 3, 4, что также дает возможность размещения на них лесных грузов с высотой каравана 2,6 м или одного яруса контейнеров максимальной массы.

Расчетный срок службы корпуса судна 24 года. В качестве материала основных конструкций корпуса применяется судостроительная сталь категорий PC D32 и PC A32 с пределом текучести 315 МПа. Верхняя часть непрерывных продольных комингсов люков, настила и набора верхней палубы выполняется из судостроительной стали повышенной прочности категории PC D40 с пределом текучести 390 МПа. Элементы конструкций палуб бака и юта, профильный прокат в надстройках и рубках выполняются из стали категории РСА.

Корпус имеет двойное дно, двойные борта, верхнюю палубу с шириной раскрытия 0,77 В, непрерывные продольные комингсы грузовых люков высотой 3,30 м с прочным палубным стрингером комингса люка, расположенным на высоте 2,5 м над верхней палубой и переходящим в носу в палубу бака, а в районе машинного отделения – в палубу юта.

Продольные комингсы грузовых трюмов установлены в плоскости продольных переборок трюмов.

Межлюковые перемычки расположены на 800 мм ниже верхней кромки продольного комингса люка.

Поперечные переборки между трюмами -- гофрированные с вертикальными гофрами, остальные переборки плоские.

Двойное дно, двойные борта, днище, верхняя и главная палубы, продольные комингсы люков и палубный стрингер комингса люка выполнены по продольной системе набора; конструкции машинного отделения, платформы, палубы бака и юта, оконечности судна – по поперечной. Прочность корпусных конструкций грузовых трюмов достаточна для неравномерной загрузки, при которой обеспечивается общая продольная и местная прочность корпуса в соответствии с одобренными классификаци-

онным обществом нормами.

Второе дно рассчитано на интенсивность распределенной нагрузки $8,1 \text{ т/м}^2$, а также на работу грейфером грузоподъемностью 16 т.

Корпус судна спроектирован на класс ЛУ2, который предполагает круглогодичное плавание в незамерзающих морях, в мелкобитом разреженном льду неарктических морей самостоятельное плавание в мелкобитом разреженном льду толщиной 0,55 м со скоростью 5 узлов; плавание в канале за ледоколом в сплошном льду толщиной 0,5 м со скоростью 3 узла. Назначение ледовой категории определяется фактическими условиями порта Астрахань – обычно зимой лед толщиной до 20 см, иногда до 80 см, соответственно капитаня порта требует наличие ледовой категории не ниже ЛУ1-ЛУ2.

Защита корпуса от коррозии гарантируется применением короткозамкнутой протекторной защиты и эффективного лакокрасочного покрытия.

Исходя из результатов испытаний, для главной энергетической установки выбраны два среднеоборотных дизеля типа 6L20 фирмы Вяртсиля со спецификационной максимальной длительной мощностью по 1200 кВт. Главные двигатели работают на тяжелых сортах топлива вязкостью до 380 сСт. Запасы тяжелого топлива размещаются в диптанках в районе носовой переборки МО, отделенных от забортной воды двойными дном и бортами.

Электроэнергетическая установка судна состоит из трех дизель-генераторов мощностью 240 кВт и одного аварийно-стояночного дизель-генератора мощностью 136 кВт фирмы «Вольво-Пента». Приводные двигатели генераторов работают на дизельном топливе.

Предусмотренные судовые устройства обеспечивают выполнение требований надзорных органов к данному типу судна.

Спуск и подъем носовых и кормовых якорей выполняется якорно-швартовыми лебедками фирмы KGW с автоматическим натяжением швартовов. Носовая (с ПрБ) и кормовая якорно-швартовные лебедки оборудованы гидравлической системой дистанционной отдачи якорей. Управление дистанционной отдачей осуществляется из центрального объединенного пульта управления в рулевой рубке.

По корме с ЛБ установлена сбрасываемая спасательная танкерная шлюпка типа GAR 6.0 фирмы Davit International вместимостью 16 человек, спускаемая как методом свободного падения, так и контролируемым спуском. На палубе ходового мостика по ПрБ установлена дежурная шлюпка с подвесным мотором вместимостью 6 человек типа RR4.2 фирмы Davit International. На палубе юта с ПрБ установлен спускаемый плот вместимостью 16 чел. Подъем и спуск дежурной шлюпки и спускаемого плота осуществляется краном типа D-CRm.R 14/3.5 (SWL 15 кН) фирмы Davit International. На палубе ходового мостика с ЛБ установлен сбрасываемый плот вместимостью 16 чел., на палубе бака – сбрасываемый плот вместимостью 6 чел.

Состав средств связи предусмотрен в объеме требований Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ) для морских районов А1+А2+А3, а также в реках. Комплекс современного судового радиоборудования обеспечивает связь при бедствиях и безопасность мореплавания, а также эксплуатационную связь общего назначения.

Для приема и отдачи балласта на судне имеется балластно-осушительная система, обслуживаемая двумя электроприводными центробежными насосами и водоструйным эжектором. Одновременная работа этих средств дает возможность откачать весь балласт за время не более 7 ч.

В целях уменьшения длины трубопроводов балластной системы и улучшения условий труда экипажа на судне предусмотрена установка дистанционно управляемой арматуры.

Управление судном, главной энергетической установкой, рулевым устройством и подруливающим устройством, радионавигационными средствами и др. осуществляется из центрального объединенного пульта управления в рулевой рубке. Функции управления судном могут осуществляться также с бортовых пультов. Автоматизированная система предусматривает управление судном из рулевой рубки без несения постоянной вахты в машинном отделении. Гирокомпас с репитерами, главный магнитный компас, относительный лаг, эхолот, приемоиндикатор GPS, 2 основных и речной радиолокаторы, а также электронно-картографическая система ECS, регистратор данных рейса и АИС обеспечивают судоводителя и системы-потребители навигационной информацией.

Первое судно серии «Iran Anzali» было сдано Заказчику 15 февраля 2007 года, второе судно «Iran Nowshahr» 29 мая 2007 года, третье судно «Iran Amirabad» 12 сентября 2007 года (рис. 9), четвертое судно «Iran Torkaman» 22 мая 2008 года.

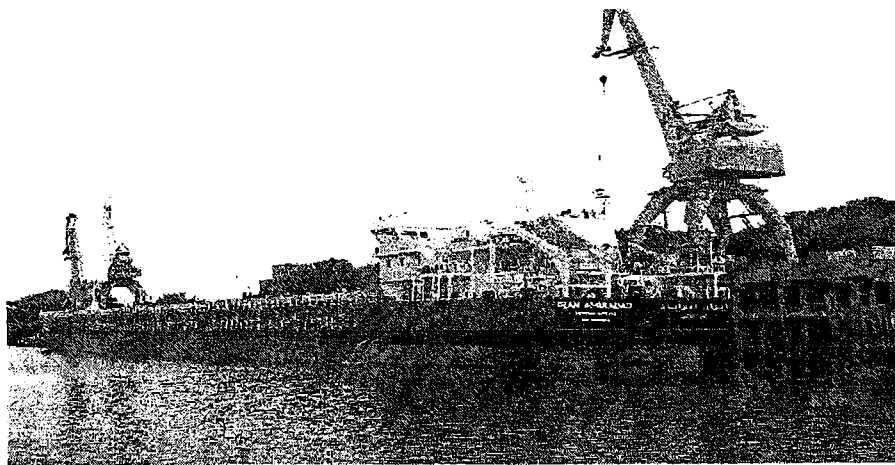


Рис. 9. Судно «Iran Amirabad» у достроечного причала ВЗС3

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что главные характеристики «каспийского» сухогрузного судна определяются путевыми условиями ВДСК и Волго-Каспийского канала так: габаритная длина 140 м, габаритная ширина 16,8 м, осадка в пределах 3,60 - 4,60 м, ветро-волновыми условиями Каспийского моря (I или II ограниченный) и ледовыми условиями порта Астрахань (ЛУ1-ЛУ2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РСФСР. Т.8. – Волго-Донской водный путь. – Минречфлот РСФСР. – 1990. – 86 с.
2. Ветер и волны в морях и океанах: Справочные данные / Регистр СССР. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.
3. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
4. Егоров Г.В., Ильницкий И.А. Определение главных размерений судов ограниченных районов плавания на основе анализа путевых условий // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2007. – Вип. 22. – С. 20-39.
5. Исследование ходовых качеств сухогрузного судна проекта RSD19. – Научно-технический отчет. Вып. № 43433. – СПб.: ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова, 2005. – 53 с.
6. Ковтунов А.В., Котляренко А.Ф., Куренков П.В. Роль транспортной системы России в геополитике, геоэкономике и геологистике. – Самара: СамГАПС, 2003. – 634 с.
7. Морские порты России: Справочник. – М.: Морские вести России, 2007. – 472 с.
8. Новосельцев Б.Ф., Ефремов Н.А. и др. Внутренний водный транспорт России. – М., 2006. – 224 с.
9. Попов С.Ю. Повышение эффективности использования транспортной инфраструктуры международного значения и ее развитие в каспийском регионе: Автореф. дис. ... канд. экон. наук / ГУУ. – М., 2001. – 28 с.
10. Справочник по теории корабля: В 3-х томах. – Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.

Надійшла 28.03.08

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ СУДНА НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Рассматривается задача об особенностях бортовых параметрических колебаний судна на нерегулярном волнении. Исследование проведено методами математического моделирования с привлечением данных натурных измерений. Интерпретация результатов моделирования позволила выявить закономерности возникновения и развития параметрических колебаний при различных значениях курсового угла и структуры волновых пакетов.

Ключевые слова: *нелинейная качка, нерегулярное волнение, параметрический резонанс.*

Поведение судна при качке на регулярном волнении при произвольных курсовых углах – достаточно хорошо изученная область теории корабля. Здесь разработаны расчетные алгоритмы для конкретных практических приложений на основе теоретических и экспериментальных методов исследования [1]-[23]. Гораздо сложнее выглядит задача о динамике взаимодействия судна с внешней средой на нерегулярном волнении. Разнообразие форм и структур волновых пакетов значительно усложняет строгое математическое описание группового характера волнения и создает трудности использования полученных данных в задачах остойчивости судна на волнении. Вместе с тем, сформулированный в работе [11] подход к анализу динамики судна при воздействии пакетов волн позволяет формализовать задачу и упростить ее решение. Это открывает перспективы дальнейших исследований, направленных на выявление особенностей динамических ситуаций и реализации полученных данных в различных технических приложениях, в том числе и в бортовых интеллектуальных системах (ИС),

Параметрический резонанс – достаточно необычный режим бортовой качки. Впервые такой режим исследован в работе [17]. В последующих публикациях параметрические колебания рассматривались в основном для положения судна лагом к регулярному волнению [18]. Исключения составляли работы [7] и [10], в первой из которых обстоятельно исследован параметрический резонанс на продольном волнении, а во второй – продемонстрирована возможность возникновения этого явления на

нерегулярном волнении. Следует отметить, что именно ситуация возникновения параметрических колебаний на продольном (попутном и встречном) волнении возникает значительно чаще и представляет грозную опасность для судоходства. Действительно, глубина модуляции параметра, описывающего колебания восстанавливающего момента (метацентрической высоты в линейной постановке) на продольном волнении в уравнении Матье [19] значительно больше (в несколько раз) по сравнению с положением судна лагом к волнению, Поэтому преодоление «порога возбуждения» [18] параметрического резонанса в этих условиях достигается даже при сравнительно слабом волнении. Об этом свидетельствуют аварии судов в режиме параметрического резонанса, анализу которых в настоящее время посвящено большое количество работ, а на международной конференции по остойчивости и безопасности мореплавания STAB-2003 и STAB-2006 этой проблеме были посвящены доклады на специальной организованной секции [21]-[23].

Рассматриваемые колебательные режимы поведения судна на нерегулярном волнении относятся к структурам, характерным для диссипативных систем. Для таких систем несправедлива теорема Лиувилля и фазовый объем не сохраняется постоянным. «Сжатие» фазового объема приводит к тому, что при $t \rightarrow \infty$ все решения диссипативной системы будут стягиваться к некоторому подмножеству фазового пространства, называемому аттрактором [3]. Область притяжения аттрактора представляет собой совокупность начальных условий (характерные точки фазового пространства), при которых фазовые траектории, начавшиеся в этих точках, стремятся к аттрактору. Рассматриваемые режимы параметрической качки связаны с возникновением аттракторов типа «пределный цикл», причем этот цикл неустойчив вследствие ограниченного числа резонансных волн в составе нерегулярного волнения [14]. Это позволяет в рамках принятого подхода достаточно полно представить картину поведения судна на нерегулярном волнении. Причем в силу ограниченности исследуемого временного интервала даже в случае воздействия пакетов регулярных волн в составе нерегулярного волнения (случай детерминированной системы) хаотические колебания практически не успевают развиваться [12].

При взаимодействии судна с пакетами набегающих волн наблюдаются различные картины колебательного движения судна, движущегося с курсовым углом на нерегулярном попутном волнении. Усиление и ослабление колебаний при прохождении пакетов волн связано с резонансными режимами качки (основной и параметрический резонанс). Особый практический интерес вызывает достаточно сложный случай бортовой качки при прохождении группы волн – режим главного параметрического резонанса. Возникновение такого режима при движении судна произвольным курсом на нерегулярном волнении наиболее ярко проявляется при воздействии пакетов волн. Переход системы на режим парамет-

рического резонанса означает, что в ней наблюдаются сильные колебания, приводящие к резкому снижению сопротивляемости судна внешним креплениям нагрузкам.

При исследовании нелинейных систем связь между движением и видом математической модели определяется рядом параметров, являющихся медленно меняющимися функциями времени. Эти параметры зависят от некоторых характеристик самого движения (амплитуды колебаний, фазы относительно данного сигнала), которые также являются медленно меняющимися функциями времени. Поэтому в подходяще выбранной окрестности произвольного момента времени t_0 ($t_1 < t_0 < t_2$) эти параметры могут быть «заморожены» и рассматриваться как постоянные. Полученное таким образом «локальное» решение будет зависеть от этих медленно меняющихся параметров и его можно рассматривать как часть реального колебательного движения. Для полного представления закономерностей поведения рассматриваемой нелинейной системы можно последовательно анализировать отдельные ее состояния и определять огибающую для избранного состояния, т.е. исследовать динамику процесса в рассматриваемом промежутке времени. Этот принцип часто используется при анализе нелинейных систем и может быть развит для случая бортовых параметрических колебаний судна на нерегулярном волнении. Действительно, рассматривая внешнее возмущение как последовательность пакетов волн различной формы и интенсивности, можно выделять промежутки времени, в которых исследуемый процесс проявляется наиболее ярко [11].

Пусть имеется некоторый информационный оператор F_M , позволяющий осуществлять преобразование информации о динамике взаимодействия судна с пакетами набегающих волн. Структура такого оператора должна учитывать особенности поведения судна в рассматриваемой ситуации, установленные на основе данных натуральных измерений. Исходная информация при формализации задачи представлялась в виде множеств ситуаций $\{ \bar{X} \}$ и поведений модели $\{ \bar{Y} \}$. Эти множества в j -м решении связаны соотношением [8]

$$\bar{Y} = F_M(\bar{X}), \quad \bar{Y} = \{Y_j\}, \quad \bar{X} = \{X_j\}, \quad (j = \overline{1, k}). \quad (1)$$

Условие адекватности математической модели определялось как

$$Y \in S \quad \forall c \in C_m, \quad (2)$$

где S – область, ограничивающая поведение модели;

C_m – цели моделирования.

Процедура построения модели связана с решением проблемы выбора класса модели Q и области S . В качестве меры отклонения поведения модели используется функция штрафа (неадекватности)

$$\Phi(Y, S) = \begin{cases} 0 & \text{при } Y \in S, \\ \varphi(Y, S) & \text{при } Y \notin S \end{cases}, \quad (3)$$

где $\varphi(Y, S)$ – функция, определяющая степень неадекватности.

Разработанная с учетом этих требований имитационная модель, позволяет обеспечить контроль и прогноз развития экстремальной ситуации, связанной с ухудшением характеристик динамики судна.

Аппроксимация, отражающая особенности нерегулярного волнового поля с учетом внутригрупповой структуры и групповых свойств волнения, представлялась двухчастотным спектром [11]

$$S(\sigma, \Sigma) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} R^*(t, \tau) \exp[-i(\sigma\tau + \Sigma t)] dt d\tau, \quad (4)$$

где $R^*(t, \tau) = M^*[\zeta(t)\zeta(t+\tau)]$ – корреляционная функция процесса (M^* – оператор математического ожидания); $\zeta^0(t) = \zeta(t) - M^*\zeta(t)$.

Выражение (4) позволяет интерпретировать волнение как вероятностный процесс, полученный путем циклического возмущения (модуляции) исходного стационарного процесса. Приближенная оценка спектра для установившегося волнения может быть сделана на основе его представления в виде произведения

$$S(\sigma, \Sigma) \approx S(\sigma) S(\Sigma), \quad (5)$$

где $S(\sigma)$ – частотный спектр, учитывающий внутригрупповую структуру волнения;

$S(\Sigma)$ – спектр огибающей случайного процесса волнения, учитывающий групповые свойства волн.

Математическая модель, характеризующая динамику судна при воздействии пакетов волн, описывается системой дифференциальных уравнений, характеризующих бортовую, вертикальную и килевую качку [4],[11]:

$$(J_x + \mu_{\theta\theta})\theta'' + M_R(\theta') + M(\theta, \varphi_k, t) = M_x(t);$$

$$\begin{aligned} (D/g + \mu_{33})\zeta_G'' + v_\zeta \zeta_G' + \rho g S \zeta_G + \mu_{33} x_1 \psi'' + (v_{\zeta\psi} - v_0 \mu_{33})\psi' + (\rho g S l - v_0 v_\zeta)\psi = \\ = -r_0(\rho g a_0 - \sigma^2 a_0' - \sigma b_0') \cos \sigma t - r_0(\rho g b_0 - \sigma^2 b_0'' + \sigma a_0') \sin \sigma t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (J_y + \mu_{55})\psi'' + [v_\psi + (v_0^2/\sigma^2)v_\zeta]\psi' + (DH\psi - v_0^2 \mu_{33})\psi + \mu_{33} x_1 \zeta_G'' + \\ + (v_{\zeta\psi} + v_0 \mu_{33})\zeta_G' + (\rho g S l + v_0 v_\zeta)\zeta_G = -r_0(\rho g a_1 - \sigma^2 a_1'' - \sigma b_1') \cos \sigma t - \\ - r_0(\rho g b_1 - \sigma^2 b_1'' + \sigma a_1') \sin \sigma t, \end{aligned} \quad (6)$$

где $(J_x + \mu_{\theta\theta})\theta''$, $M_R(\theta')$, $M(\theta, \varphi_k, t)$, $M_x(t)$ – инерционная, демпфирующая, восстанавливающая и возмущающая компоненты; остальные обозначения соответствуют принятым в работе [4].

Отличие этой системы от традиционно используемых в задачах качки состоит в том, что нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее бортовую качку на нерегулярном волнении, включает существенно нелинейную пространственную функцию, определяющую восстанавливающий момент $M(\theta, \varphi_k, t)$, непрерывно изменяющийся во времени (рис. 1). Величина этого момента формируется за счет изменения формы ватерлинии и влияния гидродинамических факторов. При движении на продольном волнении изменение $M(\theta, \varphi_k, t)$ происходит также за счет влияния продольной качки, которое можно учесть при интегрировании системы дифференциальных уравнений. Выполненные ранее исследования [9] показывают, что приращение восстанавливающего момента, вызванное продольной качкой, незначительно, и может быть учено при построении функции $M(\theta, \varphi_k, t)$. В рассматриваемом случае эта функция принята на основе аппроксимации данных физического моделирования, при котором влияние продольной качки и других гидродинамических факторов учитывается автоматически. Возникновение бортовой качки при движении судна на продольном волнении происходит за счет влияния трехмерного волнения, для моделирования которого разработаны специальные алгоритмы [12], находящие практическое применение в бортовых ИС и интеллектуальных тренажерах.

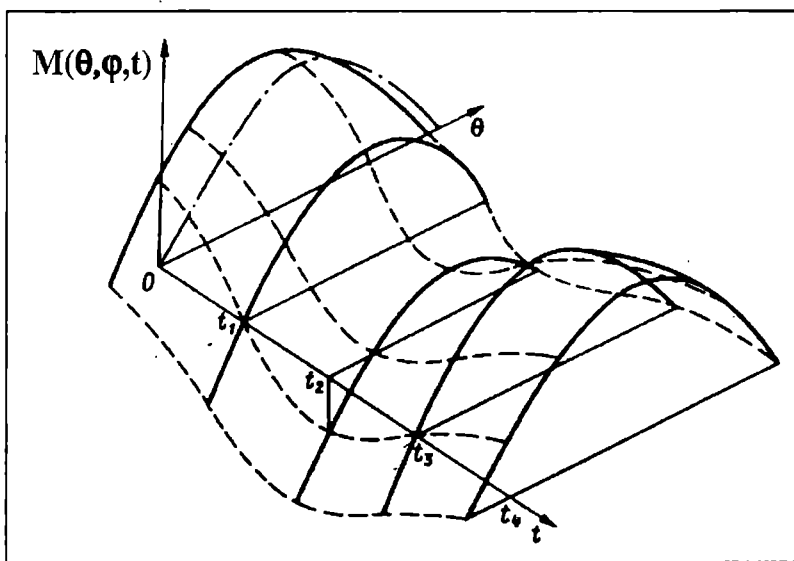


Рис. 1. Поверхность, характеризующая непрерывное изменение восстанавливающего момента судна на волнении: сплошные кривые – мгновенные диаграммы остойчивости; пунктир – временные кривые (сечения поверхности при $\theta = \text{const}$); штрих-пунктир – диаграмма остойчивости на тихой воде

Наиболее часто встречающиеся группы волн хорошо описываются известной из теории волн зависимостью [11]

$$\zeta = 2r_w(t) \sin(k_1 * \eta - \sigma_1 t), \quad (7)$$

где $r_w(t)$ – медленно меняющаяся во времени амплитуда огибающей, колеблющаяся с частотой σ_2 и фазой $k_2 * \eta$;

$\sigma_1, k_1 * \eta$ – частота и фаза волн, составляющих группу.

Такое представление группы волн позволяет представить нерегулярное волнение в виде последовательно воздействующих пакетов волн различной формы и интенсивности и рассматривать изменение восстанавливающего момента при различных курсовых углах к набегающему волнению как модулированное колебание его регулярной части, определяемой выражением

$$M(\theta, \varphi_k, t) = D \Delta l(\theta, \varphi_k, t) \cos(\sigma_k t + \varepsilon_0). \quad (8)$$

Как показывают расчеты, величину $\Delta l(\theta, \varphi, t)$ в этом случае можно также считать медленно меняющейся во времени и аппроксимировать функцию $M(\theta, \varphi_k, t)$ зависимостью [9]

$$M(\theta, \varphi_k, t) = D[l(\theta, \varphi_k)_{\text{mid}} + \Delta l(\theta, \varphi) \sin(\sigma_k * t + \varepsilon_0 *) \cos(\sigma_k t + \varepsilon_0)], \quad (9)$$

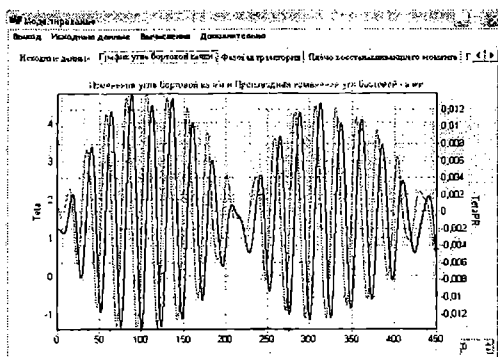
где $\sigma_k *$, $\varepsilon_0 *$ – частота и фаза огибающей амплитудного значения восстанавливающего момента при различных курсовых углах на попутном волнении.

Математическое моделирование нелинейных параметрических колебаний при движении судна на нерегулярном продольном волнении проведено на основе соотношений (4)-(9). Дифференциальные уравнения продольной качки представляют собой линейную модель, с помощью которой в замкнутом виде можно получать решение только при воздействии пакетов волн, близких к регулярным. Для принятой интерпретации нерегулярного волнения в форме (7) необходимо интегрировать полную систему (6) путем введения ряда упрощающих предположений и учета внешнего возмущения, представленного в виде пакетов волн. В настоящем исследовании рассмотрено воздействие пакетов почти регулярных волн, характеристики которых были зафиксированы в процессе обработки результатов натурных наблюдений, полученных во время испытаний контейнеровоза в Средиземном море и в Атлантическом океане. Исходная математическая модель бортовых колебаний, входящая в систему (6), в линейной постановке представляет собой известное уравнение математической физики, предложенное Матье [19]. В качестве объекта исследования принят контейнеровоз со следующими характеристиками:

$L=136,05$ м, $B=21$ м, $H=10,9$ м, $T=7,65$ м, $\delta=0,65$, $\alpha=0,78$, $\beta=0,97$, $V=17,8$ уз.

Проведенные численные эксперименты показывают, что при движении судна на нерегулярном волнении наблюдаются различные режимы колебаний (рис. 2). Наиболее интересный в практическом отношении режим – параметрический резонанс. Переход системы на этот режим означает, что в ней наблюдаются сильные колебания, приводящие к резкому снижению сопротивляемости судна внешним кренящим нагрузкам и потере устойчивости [14].

A



B

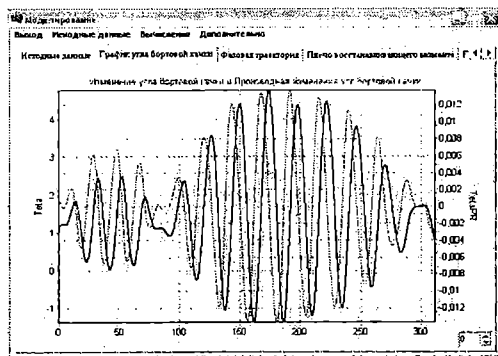


Рис. 2. Нерегулярные колебания судна при воздействии пакетов волн: А – последовательное воздействие волновых систем, близких к пакетам зыби; В – последовательное воздействие пакетов различной формы и интенсивности

Следует отметить, что в некоторых работах предлагаются пути решения проблемы за счет обеспечения в процессе проектирования судна амплитуд качки, не превышающих допустимые значения. На первый взгляд такой подход может показаться заманчивым. Действительно, при обеспечении условия $\theta \leq \theta^*$, $\Psi \leq \Psi^*$, ..., $\zeta \leq \zeta^*$ вообще отпадает необходи-

мость в построении сложных моделей и систем обеспечения безопасности мореплавания. Однако на практике могут возникать ситуации появления значительной качки, приводящей к катастрофическим последствиям. Здесь нельзя не вспомнить недавнюю трагедию с американским контейнеровозом [20]. Выявленное в результате анализа этой аварии явление параметрического резонанса при воздействии пакетов экстремальных волн (о котором авторы проекта столь огромного судна даже не предполагали) уже несколько лет является предметом дискуссий на международных конференциях, посвященных безопасности мореплавания [21]-[23].

Для иллюстрации на рис. 3 приведен пример возникновения режима параметрического резонанса, приводящего к резкому отклонению интенсивности качки судна (ДО) от условий нормальной эксплуатации.

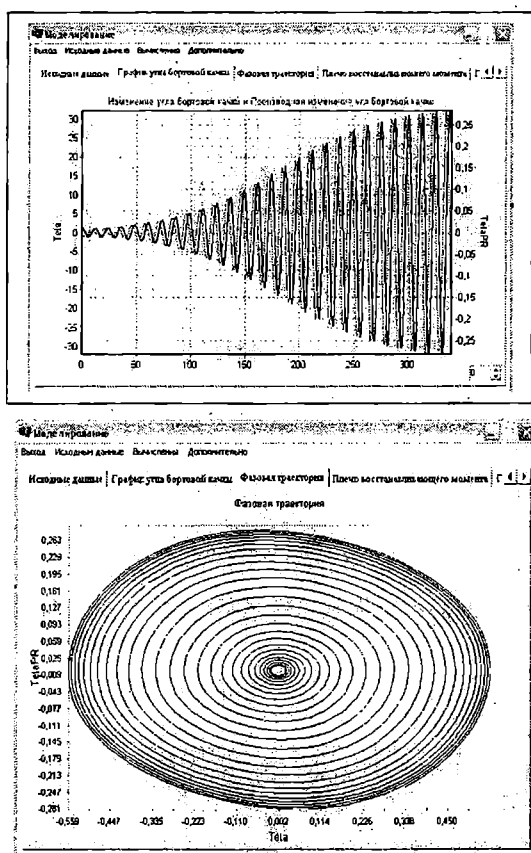


Рис. 3. Временные кривые и фазовый портрет колебаний ДО при бортовой качке в режиме параметрического резонанса

Здесь показаны временные кривые и фазовый портрет колебательного движения судна при бортовой качке на встречном нерегулярном волнении в режиме параметрического резонанса при воздействии круп-

ного пакета волн, структура которого близка к волнам зыби. Как видно из рис. 3, амплитуда бортовых параметрических колебаний в этой экстремальной ситуации быстро нарастает и стабилизируется вследствие влияния нелинейных эффектов, достигая около 30 градусов.

Интересно отметить, что килевая качка в этих условиях происходит в режиме, близком к основному резонансу. Поэтому амплитуда килевой качки при интенсивных внешних возмущениях также может достигать существенных величин, значительно превышающих допустимые углы дифферента. Результаты моделирования колебательного движения ДО в условиях резонанса килевой качки приведены на рис. 4.

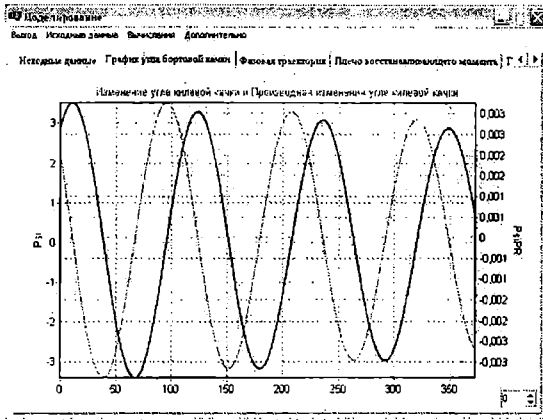


Рис. 4. Временные кривые колебаний ДО при килевой качке в режиме основного резонанса, вызванной воздействием пакета крупных волн

Результаты моделирования показывают, что при выполнении известных частотных соотношений, определяющих начальные условия развития параметрических колебаний при прохождении группы волн, возникают сложные структуры колебательных режимов качки. Особенность этих структур состоит в том, что в этих условиях формируются аттракторные множества в виде неустойчивых предельных циклов [3]. Потеря устойчивости цикла-аттрактора в рассматриваемой системе происходит по различным сценариям. Интерпретация этих сценариев дается на рис.5 и 6.

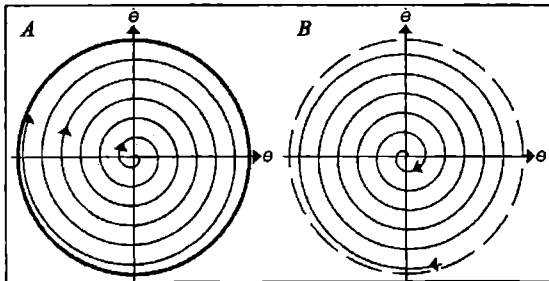


Рис. 5. Формирование предельного цикла при воздействии группы волн

Наиболее простой из них связан с особенностями пакета зыби, при воздействии которого формируется предельный цикл, характеризующийся стабилизацией амплитуды колебаний вследствие влияния нелинейности (рис. 5А).

Этот цикл возникает на участке, где последовательность волн в пакете превышает определенное значение $(hw)_{CR}$, обеспечивающее колебательный режим с практически постоянной амплитудой θ_{max} . Однако в связи с последующим постепенным уменьшением высот волн в пакете нарушаются условия устойчивости и цикл исчезает (рис. 5В).

Более сложный сценарий – столкновение с неустойчивым циклом (рис. 6). Такая ситуация на практике встречается значительно реже и характеризуется последовательным прохождением пакетов волн, содержащих волны различной интенсивности. Например, первый пакет с небольшой высотой резонансных волн приводит к формированию предельного цикла малой, а второго – большой амплитуды. Возникновение и потеря устойчивости колебательного режима («рождение и смерть цикла» по терминологии А.А. Андропова [1], [2]) происходят вследствие ограниченности зоны резонансной качки на сравнительно небольшом временном интервале интенсивных колебаний при прохождении волновых пакетов.

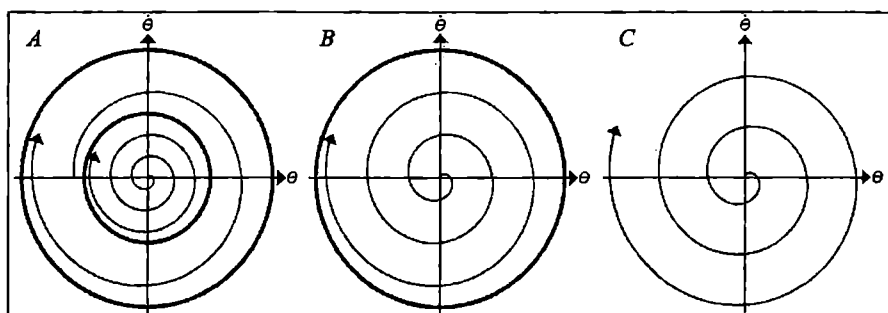


Рис. 6. Возникновение (А) и потеря устойчивости цикла (В), (С)

Интересно отметить, что развитие параметрических колебаний при формировании предельного цикла в большей степени проявляется для волновых систем, содержащих группы почти регулярных волн. В этом случае за счет большей глубины модуляции параметра, стоящего в качестве множителя при периодической функции уравнения Матье [17], [19] и обусловленного резким изменением метacentрической высоты, формируются начальные условия, обеспечивающие преодоление «порога возбуждения» [18] параметрического резонанса. В результате возникновение и развитие параметрических колебаний отмечается даже на волнах относительно меньшей крутизны.

В процессе эксперимента также производилось сопоставление топологии фазового пространства для нелинейной и линеаризованной математических моделей. Полученные данные свидетельствуют о практиче-

ской невозможности сохранения фазовых потоков, порождающих странные аттракторы и детерминированный хаос, в линеаризованных системах.

Заключение

Результаты моделирования динамики судна при воздействии пакетов волн в составе нерегулярного волнения позволяют сделать следующие выводы:

1. Возникновение и развитие параметрических колебаний в условиях нерегулярного волнения существенно зависит от структуры и последовательности воздействия волновых пакетов. Наиболее опасные ситуации возникают при воздействии пакетов зыби, приводящих к резкому снижению восприятия динамических кренящих нагрузок и ухудшению устойчивости судна.

2. В процессе анализа установлены различные сценарии возникновения аттракторных множеств при параметрических колебаниях, связанных со сложным нелинейным взаимодействием судна с внешней средой в условиях нерегулярного волнения.

3. Наиболее характерный вид сценария – формирование неустойчивого предельного цикла. Амплитуды параметрических колебаний при реализации такого сценария могут достигать существенных величин.

Закономерности поведения фазовых траекторий в условиях неустойчивости могут быть положены в основу разработки динамической базы знаний, позволяющей осуществлять прогноз и интерпретацию экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах реального времени.

В заключение следует отметить, что в 2004 году исполнилось 50 лет со дня публикации одной из первых работ [17] по параметрическому резонансу бортовой качки судна. С тех пор эта проблема постоянно привлекает внимание исследователей, а в последние годы, в связи с рядом тяжелых аварий, получила новое развитие и приобрела важное практическое приложение при обеспечении безопасности мореплавания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андронов А.А. *Собрание сочинений*. – М.: Наука. – 1956. – С. 85-124.
2. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. *Качественная теория динамических систем второго порядка*. – М.: Наука, 1966. – 350 с.
3. Арнольд В.И. *Теория катастроф*. – М.: Наука, 1990. – 128 с.
4. Благовещенский С.Н., Семенов-Тянь-Шанский В.В. *Качка корабля*. – Л.: Судостроение, 1969. – 392 с.

5. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. – Л.: Судостроение, 1969. – 432 с.
6. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.
7. Бородай И.К., Мореншильдт В.А., Виленский Г.В., Дубицкий В.М., Смирнов Б.Н. Прикладные задачи динамики судов на волнении. – Л.: Судостроение, 1989. – 264 с.
8. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Под ред. Ю.И. Нечаева. СПб.: ГМТУ, 2001. – 395 с.
9. Нечаев Ю.И. Влияние продольной качки на остойчивость судна при движении на волнении // В сб.: Гидромеханика. Вып. 28. – К., 1974. – С.37- 42.
10. Нечаев Ю.И. Исследование амплитуд бортовой качки судна в режиме параметрического резонанса на продольном нерегулярном волнении // Труды НКИ. Вып. 58. 1972. – С.52-59.
11. Нечаев Ю.И. Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции. Л.: Судостроение, 1989. – 240 с.
12. Нечаев Ю.И., Кузнецова И.А. Детерминированный хаос в фазовых портретах динамики судна на волнении // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения. К.: Ин-т математики АН Украины, 1993. – С. 103-107.
13. Нечаев Ю.И., Бухановский А.В., Иванов С.А. Виртуальное моделирование динамики судна на морском волнении в Интеллектуальных тренажерах // Искусственный интеллект. № 3. 2004. – С. 350-359.
14. Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Формирование аттракторных множеств при исследовании динамики сложной системы в экстремальных ситуациях // Сборник докладов 4-й Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии УИТ-2006». Т. 2. – С. 45-51.
15. Нечаев Ю.И. Нелинейная динамика и парадигмы вычислений при анализе экстремальных ситуаций // Доклад на юбилейной конференции, посвященной памяти Л. Эйлера. – СПб.: РАН. 2007. – С. 385-390.
16. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. – М.: Наука. 1990, – 272 с.
17. Сизов В.Г. О явлении параметрического резонанса при бортовой качке корабля // Институт механики АН СССР. Инженерный сборник. Т. XX. – 1954. – С. 21-24.
18. Стреляев Л.Н. О пороге возбуждения параметрического резонанса бортовой качки судна, расположенного лагом к волне // Теоретические и практические вопросы мореходных качеств судов. – Л.: Транспорт. 1967. – С. 292-301.

19. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. – М.: Мир, 1968. – 432 с.
20. France W., Levadou M., Treakle T.W., Paulling J.R., Michel R.K., Moore K. An investigation of head-sea parametric rolling and its Influence on Container Lashing Systems // SNAME Annual Meeting 2001 Presentatio. P. 1-24.
21. Belenky V., Han-Chang Yu, Weems K. Numerical procedures and practical experience of assessment of parametric roll of container carriers // Proceedings of 9th International conference «Stability of ship ocean vehicles» STAB-2006. Vol.1. Rio de Janeiro. 2006. P. 119-130.
22. Levadou M., Riaan van,t Veer. Parametric roll and ship design // Proceedings of 9th International conference «Stability of ship ocean vehicles» STAB-2006. Vol.1. Rio de Janeiro. 2006. P. 191-207.
23. Munif A., Ikeda Y., Fujiwara T., Katayama T. Parametric roll resonance of large passenger ship in dead ship condition in all heading angles // Proceedings of 9th International conference «Stability of ship ocean vehicles» STAB-2006. Vol.1. Rio de Janeiro. 2006. P. 81-88.
24. Spanos D., Papanikolaou A. Numerical simulation of parametric roll in head seas // Proceedings of 9th International conference «Stability of ship ocean vehicles» STAB-2006. Vol.1. Rio de Janeiro. 2006. P. 169-180.
25. Spirou K.J. Criteria for parametric rolling // Proceedings of 7th International Ship Stability Workshop. Shanghai. China, 2004. P. 1-12.

Надійшла 10.03.08

ВОЛНОВЫЕ СИЛЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПРИ ПРОДОЛЬНО-ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КАЧКЕ СУДНА НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Поставлена и решена задача об определении продольной гидродинамической силы при продольно-горизонтальной качке судна на регулярном волнении. Показано, что это сила второго порядка малости, или, что, то же, дополнительное волновое сопротивление судна на волнении, получена комбинацией потенциала излучения и дифракционного потенциала, а также потенциала набегающего волнения. Все перечисленные величины представляют собой гидродинамические процессы первого порядка малости.

Ключевые слова: продольно-горизонтальная качка, регулярное волнение, дополнительное волновое сопротивление.

Вычисление сил волновой природы, действующих на судно со стороны волнения, можно выполнить двумя путями [1]: непосредственным интегрированием гидродинамических давлений по мгновенной смоченной поверхности [2], [3], [4] и с помощью применения теорем об изменении количества движения к объему жидкости, внутри которого располагается судно [5], [6], [7]. В этом случае контрольная поверхность рассматриваемого объема имеет простую форму цилиндра бесконечного радиуса, и в расчетах используются асимптотические (на большом удалении от судна) выражения соответствующих характеристик. Они по структуре намного проще аналогичных выражений вблизи поверхности корпуса, т.е. вблизи системы особенностей, имитирующих обтекание судна.

Анализ публикаций результатов исследований задач гидродинамической теории качки показывает, что наиболее детально изучены вертикальная, килевая и бортовая качка. Эти так называемые основные виды качки в связи с действием восстанавливающих силы и моментов допускают наличие свободных и вынужденных колебаний судна и возникновение резонанса, вызывающего большой практический интерес. Поэтому подавляющее число работ посвящено исследованию основных видов качки. При колебаниях судна особый интерес представляют гидродинамические силы второго порядка малости, действие которых в связи с малым демпфированием может вызвать значительные линейные и угловые перемещения судна в горизонтальной плоскости.

Достаточно редко встречаются работы, посвященные исследованию возникновения постоянной во времени продольно-горизонтальной

силы, которую называют дополнительным волновым сопротивлением судна на волнении. Первое приближенное решение задачи о дополнительном волновом сопротивлении было получено Ховелоком [8], который не учитывал влияние дифрагированного волнового движения.

В работе Герритсмы и Бойкельмана [9] продемонстрировано более корректное, чем в [8], решение задачи, однако проверка соответствия теоретических и экспериментальных данных не выполнена, а данные Хавелока [8] имеют 50% отличие от результатов [9]. Тщательное исследование задачи о дополнительном волновом сопротивлении предпринято Анкудиновым [10], однако полное отсутствие каких-либо вычислительных результатов не позволяет оценить качество полученного решения. Наиболее полное из известных решений задачи о дополнительном волновом сопротивлении судна на волнении получено В.Г. Сизовым [11], однако отсутствие каких-либо попыток выполнения практических расчетов на ЭВМ вызывает настороженное отношение специалистов к работам такого типа.

В работе [4] приведено теоретическое решение задачи об определении волнового сопротивления судна на волнении с использованием метода плоских сечений. Естественно, что в таком решении продольно-горизонтальные колебания судна не учитываются.

Для обоснованной оценки вклада продольно-горизонтальных колебаний судна в дополнительное волновое сопротивление на волнении в представленной ниже статье поставлена и решена задача об определении неизменной во времени гидродинамической силы второго порядка малости (т.е. дополнительного волнового сопротивления) при движении тонкого (мичелевского) судна, совершающего только продольно-горизонтальную качку, на встречном регулярном волнении по глубоководному фарватеру.

Выражение для силы второго порядка малости включает ряд гидродинамических характеристик первого порядка малости, в частности:

- комплексную амплитуду $r_e(u_0 - iv_0)e^{i\omega t}$ продольно-горизонтальной качки;
- асимптотическое (при $r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$) выражение функции излучения $\Phi_1(\theta, r, z)e^{i\omega t}$ продольно-горизонтальных колебаний;
- асимптотическое (при $r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$) выражение дифракционного потенциала $\Phi_d(\theta, r, z)e^{i\omega t}$ продольно-горизонтальной качки. Здесь $\omega = \sigma + \frac{\sigma^2}{g}V$ – кажущаяся частота;

σ – частота набегающего волнения;

V – скорость хода судна;

r_e – амплитуда волнения;

$(u_0 - iv_0)$ – относительная комплексная амплитуда продольно-горизонтальной качки.

Найдя асимптотику функции излучения $\Phi_1(\theta, r, z)$, можно определить величины коэффициента волнового демпфирования и возмущающей силы. Применив расчетный метод вычисления обобщенной присоединенной массы при продольно-горизонтальных колебаниях, а также используя найденные значения демпфирующих и возмущающих сил, можно составить уравнение продольно-горизонтальной качки судна. Решение этого уравнения определяет элементы амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик качки.

Следуя [12], судно, у которого $\frac{B}{L} = O(\varepsilon)$, $\varepsilon \ll 1$, а плоскость, касательная к смоченной поверхности корпуса, составляет малый угол с его диаметральной плоскостью, будем считать тонким.

Пусть тонкое судно следует по глубоководному фарватеру прямым курсом со скоростью V навстречу регулярному волнению с амплитудой r_0 и круговой частотой σ . При этом судно совершает гармонические продольно – горизонтальные колебания с кажущейся частотой ω . Полагая, что относительная скорость хода судна $Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ мала, будем считать, что ее влияние на динамику объекта проявляется только через кажущуюся частоту колебаний судна. Поэтому ниже формулируется и решается задача для потенциала скоростей тонкого судна, совершающего продольно-горизонтальную качку с частотой ω без хода на глубокой воде [13].

Искомый потенциал скоростей

$$\begin{aligned} \Phi_1(x, y, z, t) &= R e \cdot \{ [\Phi_{1c}(x, y, z) - i \cdot \Phi_{1s}(x, y, z)] \cdot e^{i\omega t} \} = \\ &= \Phi_{1c}(x, y, z) \cdot \cos \omega t + \Phi_{1s}(x, y, z) \cdot \sin \omega t. \end{aligned} \quad (1)$$

Амплитуды Φ_{1c} и Φ_{1s} удовлетворяют следующим дифференциальным системам [12]

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) U(x, y, z) = 0, \quad (x, y, z) \in E_0; \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \kappa \right) U(x, y, 0) = 0, \quad (x, y) \in \Sigma_0, \quad \kappa = \frac{\omega^2}{g} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \Phi_{1c}(x, \pm 0, z) = \pm \frac{\partial y(x, z)}{\partial x}, \quad (x, z) \in S_0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \Phi_{1s}(x, \pm 0, z) = 0, \quad (x, z) \in \{y = 0\} \quad (5)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} |\overline{\text{grad}} \cdot U \cdot (x, y, z)| = 0, \quad \lim_{z \rightarrow \infty} |\overline{\text{grad}} \cdot U \cdot (x, y, z)| = 0, \\ (x, y, z) \in E_0. \quad (6)$$

Функция $\Phi_1(x, y, z, t)$ должна удовлетворять принципу излучения, согласно которому волны, вызванные колебаниями судна, расходятся от него во все стороны.

В краевой задаче E_0 – нижнее полупространство с вырезом диаметральной плоскости судна S_0 , граница Σ_0 – плоскость $z=0$ с исключенным отрезком $\Delta = S_0 \cap \{z=0\} = \left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ оси Ox , $y=y(x, z)$ – уравнение поверхности корпуса судна. Ось Ox расположена на невозмущенной свободной поверхности и направлена в нос судна, ось Oy – на правый борт, ось Oz – вниз. Специально заметим, что краевая задача сформулирована для единичной скорости продольно-горизонтальных колебаний диаметрали S_0 .

Разлагая искомые потенциалы $\Phi_{1c}(x, y, z)$ и $\Phi_{1s}(x, y, z)$ в обобщенный интеграл Фурье-Митчеля и отыскивая решения возникающих краевых задач, получаем следующие выражения функций Φ_{1c} , Φ_{1s} :

$$\Phi_{1c}(x, y, z) = -\frac{2}{\pi^2} \int_0^\infty \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^T \frac{\partial y(\xi, \zeta)}{\partial \xi} \phi(\zeta, \mu) K_0(\mu R) \frac{\mu^2}{\kappa^2 + \mu^2} \phi(z, \mu) d\zeta d\xi d\mu + \\ + \kappa e^{-\kappa z} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^T \frac{\partial y(\xi, \zeta)}{\partial \xi} N_0(\kappa R) e^{-\kappa \zeta} d\zeta d\xi, \quad (7)$$

$$\Phi_{1c}(x, y, z) = -\frac{2}{\pi^2} \int_0^\infty \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^T \frac{\partial y(\xi, \zeta)}{\partial \xi} \phi(\zeta, \mu) K_0(\mu R) \frac{\mu^2}{\kappa^2 + \mu^2} \phi(z, \mu) d\zeta d\xi d\mu + \\ + \kappa e^{-\kappa z} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^T \frac{\partial y(\xi, \zeta)}{\partial \xi} N_0(\kappa R) e^{-\kappa \zeta} d\zeta d\xi, \quad (8)$$

$$\Phi(z, \mu) = \cos \mu z - \frac{\kappa}{\mu} \cdot \sin \mu z,$$

где $J_0(s), N_0(s), K_0(s)$ – функции Бесселя, Неймана и Макдональда нулевого порядка.

На бесконечном удалении от судна $r \rightarrow \infty$ потенциалы Φ_{1c} , Φ_{1s} допускают следующие асимптотические представления:

$$\Phi_{1c}(\theta, r, z) \sim \exp(-\kappa z) \sqrt{\frac{2\kappa}{\pi r}} \left\{ \sin\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-L/2}^{L/2} F(\xi) \cos(\kappa \xi \cos \theta) d\xi - \right. \\ \left. - \cos\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-L/2}^{L/2} F(\xi) \sin(\kappa \xi \cos \theta) d\xi \right\}, \quad (9)$$

$$\Phi_{1s}(\theta, r, z) \sim -\exp(-\kappa z) \sqrt{\frac{2\kappa}{\pi r}} \left\{ \cos\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-L/2}^{L/2} F(\xi) \cos(\kappa \xi \cos \theta) d\xi + \right. \\ \left. + \sin\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-L/2}^{L/2} F(\xi) \sin(\kappa \xi \cos \theta) d\xi \right\}, \quad (10)$$

$$F(\xi) = \int_0^T \frac{\partial y(\xi, \zeta)}{\partial \xi} \exp(-\kappa \zeta) d\zeta. \quad (11)$$

Здесь введены цилиндрические координаты $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\theta = \arccos \frac{x}{r}$, z .

Коэффициент волнового демпфирования продольно – горизонтальной качки μ_{11} удобно вычислять, следуя М.Д. Хаскинду [2], из анализа потока энергии, уносимого поверхностными волнами от качающегося судна. Используя формулу М.Д. Хаскинда-Дж. Ньюмана [14] для средней за период колебаний энергии, уносимой волнами от качающегося судна, находим

$$\mu_{11}(\omega) = 2 \frac{\rho \omega^3}{g} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} F(\xi) F(x) J_0 \left[\frac{\omega^2}{g} |x - \xi| \right] d\xi dx \quad (12)$$

Возмущающую силу, которая поддерживает гармонические продольно-горизонтальные колебания судна, можно определить, не решая дифракционную задачу, а используя формулу М.Д. Хаскинда [2], детально исследованную затем Дж. Ньюманом [14]. Такой подход удобен, поскольку для вычислений используются асимптотические (при $r \rightarrow \infty$) выражения функции излучения, а сама возмущающая сила получается без искусственного разделения на главную и гидродинамическую составляющие.

Формула М.Д. Хаскинда имеет вид

$$X_1 = i\sigma\rho \exp(i\omega t) \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \Phi_0(\theta, r, z) \frac{\partial \Phi_1(\theta, r, z)}{\partial r} - \Phi_1(\theta, r, z) \frac{\partial \Phi_0(\theta, r, z)}{\partial r} \right\} r dz d\theta . \quad (13)$$

Интегрирование по переменной θ ведется в предположении, что $r \rightarrow \infty$.

В формуле (13) $\Phi_0(\theta, r, z)$ – потенциал скоростей набегающего волнения, вектор скорости которого составляет угол β с осью Ox .

$$\Phi_0(\theta, r, z) = \frac{igr_e}{\sigma} \exp(-kz) \exp[-ikr \cos(\theta - \beta)] e^{i\omega t} . \quad (14)$$

В формуле (14) учтено, что амплитудная часть потенциала скорости набегающего волнения определяется его круговой частотой σ , или, что то же, длиной волны $\lambda = \frac{2\pi g}{\sigma^2} = \frac{2\pi}{k}$, а фазовая часть, описывающая модуляцию потенциала, определяется кажущейся частотой ω , в которой учтено поступательное движение судна вдоль продольной оси.

Выполняя в (14) интегрирование по z и применяя к интегралу по θ метод стационарной фазы [16], найдем

$$X_1 = -2i\rho g r_e e^{i\omega t} [F_s(\theta) + iF_c(\theta)] \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} F_c(\theta) \\ F_s(\theta) \end{pmatrix} = \int_{-L/2}^{L/2} F(\xi) \cdot \begin{pmatrix} \cos(k\xi \cos\theta) \\ \sin(k\xi \cos\theta) \end{pmatrix} \cdot d\xi . \quad (16)$$

Заметим, что в рассматриваемом случае оказывается $\theta = \pi$.

Процесс продольно-горизонтальной качки можно представить в виде

$$\xi_g(t) = \text{Rer}_e(u_0 - iv_0) \exp(i\omega t) . \quad (17)$$

Продолжая рассмотрение кинематических и гидродинамических характеристик качки в комплексной области, примем далее:

- перемещения при продольно-горизонтальной качке $\xi_g(t) = r_e(u_0 - iv_0) \exp(i\omega t)$;
- скорости $\dot{\xi}_g(t) = i\omega r_e(u_0 - iv_0) \exp(i\omega t)$;
- ускорения $\ddot{\xi}_g(t) = -\omega^2 r_e(u_0 - iv_0) \exp(i\omega t)$.

Перейдём к рассмотрению инерционных сил при продольно-горизонтальной качке. Поскольку присоединённая масса λ_{11} мала по сравнению с массой судна, но для её теоретического определения необходимо выполнить громоздкие вычисления с использованием потенциалов (7) и (8), имеющих вблизи смоченной поверхности очень сложную структуру, значение присоединённой массы λ_{11} найдено приближённо [17] путём замены корпуса судна эквивалентным трёхосным эллипсоидом.

Получено, что для корпуса судна серии 60 с коэффициентом общей полноты $\delta=0,6$; $\frac{L}{B}=7,5$; $\frac{B}{T}=2,5$ относительное значение обобщённой присоединённой массы $\bar{\lambda}_{11} = \frac{\lambda_{11}}{\rho\delta LBT}$ составляет 0,08. Для удобства

записи величина $\rho\delta LBT + \lambda_{11}$ заменена ниже эквивалентной величиной $\rho \cdot (\delta + \bar{\lambda}_{11}) \cdot LBT = \rho \delta_1 LBT$, где $\delta_1 = 0,60 + 0,08 = 0,68$ приведенный коэффициент общей полноты качающегося судна. Учитывая формулы (15) – (16) для возмущающей силы X_1 и формулы (11), (12) для коэффициента волнового демпфирования μ_{11} , а также выражение из (17) скоростей $i\omega r_g(u_0 - iv_0)\exp(i\omega t)$ и ускорений $-\omega^2 r_g(u_0 - iv_0)\exp(i\omega t)$, получим уравнение продольно-горизонтальной качки судна, идущего на регулярном волнении.

$$-\omega^2 \rho(u - iv)\delta_1 LBT + i\omega\mu_{11}(u - iv) = -2i\gamma r_g [F_s(\theta) - iF_c(\theta)] \quad (18)$$

Его решение приведено ниже.

Перейдём теперь к рассмотрению гидродинамической задачи об определении потенциала скоростей дифрагированного волнового движения Φ_d , которое связано с преодолением набегающими волнами плавающего судна как препятствия на пути их распространения. Из потенциала скоростей набегающего волнения (14) при $\beta = \pi$ получаем косинусную и синусную составляющие горизонтальной скорости волнового движения жидкости.

$$\frac{\partial \Phi_0^c}{\partial x} = -\frac{gkr_g}{\sigma} \exp(-kz) \cos kx ; \quad \frac{\partial \Phi_0^s}{\partial x} = \frac{gkr_g}{\sigma} \exp(-kz) \sin kx . \quad (19)$$

Учитывая, что на диаметрали тонкого судна нормальные составляющие потенциала набегающего волнения и дифракционного потенциала должны иметь одинаковую величину, но противоположные знаки, и принимая во внимание граничное условие (4) для потенциала излучения на диаметрали судна, соответствующие граничные условия для дифракционного потенциала $\Phi_d(x, y, z) = \Phi_d^c(x, y, z) - i\Phi_d^s(x, y, z)$ получим в виде

$$\frac{\partial \Phi_d^c(x, \pm 0, z)}{\partial y} = \pm \frac{g\kappa r_e}{\sigma} \exp(-kz) \frac{\partial y(x, z)}{\partial x} \cos \kappa x \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Phi_d^s(x, \pm 0, z)}{\partial y} = \mp \frac{g\kappa r_e}{\sigma} \exp(-kz) \frac{\partial y(x, z)}{\partial x} \sin \kappa x \cdot \quad (21)$$

Сравнивая граничные условия (4), (5) для потенциала излучения с граничными условиями (20) и (21) для дифракционного потенциала, находим, что структура решения краевой задачи (1)-(6) для функции излучения $[\Phi_{1c}(x, y, z) - i\Phi_{1s}(x, y, z)] \exp(i\omega t)$ может быть полностью использована при определении дифракционного потенциала, если последний представить в виде

$$\Phi_d(x, y, z) = [\Phi_c^c(x, y, z) + \Phi_s^s(x, y, z)] - i[\Phi_s^c(x, y, z) + \Phi_c^s(x, y, z)]. \quad (22)$$

так, чтобы составляющие его потенциалы удовлетворяли следующим парам граничных условий

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi_c^c(x, 0, z)}{\partial y} = \pm \frac{g\kappa r_e}{\sigma} \exp(-kz) \frac{\partial y(x, z)}{\partial x} \cos \kappa x; \end{array} \right. \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi_s^c(x, 0, z)}{\partial y} = 0; \end{array} \right. \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi_s^s(x, 0, z)}{\partial y} = \mp \frac{g\kappa r_e}{\sigma} \exp(-kz) \frac{\partial y(x, z)}{\partial x} \sin \kappa x; \end{array} \right. \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi_c^s(x, 0, z)}{\partial y} = 0. \end{array} \right. \quad (26)$$

Реализуя путь решения дифференциальной системы (1)-(6), находим потенциалы $\Phi_c^c(x, y, z)$, $\Phi_c^s(x, y, z)$, $\Phi_s^c(x, y, z)$ и $\Phi_s^s(x, y, z)$. С целью сокращения изложения приведем асимптотические при $r \rightarrow \infty$ выражения указанных потенциалов, поскольку они будут использованы в дальнейшем.

$$\begin{aligned} \Phi_c^c(\theta, r, z) \approx \exp(-kz) \sqrt{\frac{2\kappa}{\pi r}} \left\{ \sin\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^c(\xi) \cos(\kappa \xi \cos \theta) d\xi - \right. \\ \left. - \cos\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^s(\xi) \sin(\kappa \xi \cos \theta) d\xi \right\} \quad (27) \end{aligned}$$

$$\Phi_1^c(\theta, r, z) \approx -\exp(-\kappa z) \sqrt{\frac{2\kappa}{\pi r}} \left\{ \cos\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^c(\xi) \cos(\kappa \xi \cos \theta) d\xi + \right. \\ \left. + \sin\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^c(\xi) \sin(\kappa \xi \cos \theta) d\xi \right\} \quad (28)$$

$$\Phi_1^s(\theta, r, z) \approx \exp(-\kappa z) \sqrt{\frac{2\kappa}{\pi r}} \left\{ \sin\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^s(\xi) \cos(\kappa \xi \cos \theta) d\xi - \right. \\ \left. - \cos\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^s(\xi) \sin(\kappa \xi \cos \theta) d\xi \right\} \quad (29)$$

$$\Phi_2^c(\theta, r, z) \approx \exp(-\kappa z) \sqrt{\frac{2\kappa}{\pi r}} \left\{ \cos\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^c(\xi) \cos(\kappa \xi \cos \theta) d\xi + \right. \\ \left. + \sin\left(\kappa r - \frac{\pi}{4}\right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_d^c(\xi) \sin(\kappa \xi \cos \theta) d\xi \right\}. \quad (30)$$

$$\left. \begin{matrix} F_d^c(\xi) \\ F_d^s(\xi) \end{matrix} \right\} = \frac{g\kappa_b}{\sigma} \left\{ \begin{matrix} \cos(\kappa \xi) \\ -\sin(\kappa \xi) \end{matrix} \right\} \int_0^r \frac{\partial y(\xi, \zeta)}{\partial \xi} \exp[-(k + \kappa)\zeta] d\zeta. \quad (31)$$

Имея асимптотические выражения при $r \rightarrow \infty$ для функции излучения $\Phi_1(\theta, r, z)$ и дифракционного потенциала $\Phi_d(\theta, r, z)$, можно перейти к определению волновой силы второго порядка малости, называемой дополнительным волновым сопротивлением судна на волнении.

Следуя Н. Сальвессену, волновую силу второго порядка малости при продольно-горизонтальной качке судна $\Theta = \Theta_{Re} - i\Theta_{Im}$ определим в виде интегрального представления

$$\Theta = -\frac{i}{2} \rho \kappa \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left[\Phi(\theta, r, z) \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\partial \Phi(\theta, r, z)}{\partial r} \right] \Phi_0(\theta, r, z) r dz d\theta. \quad (32)$$

В (32) фигурирует асимптотическое представление потенциала скоростей возмущённого волнового движения жидкости, равного сумме функции излучения и дифракционного потенциала при $r \rightarrow \infty$

$$\Phi(\theta, r, z) = \Phi_1(\theta, r, z) + \Phi_d(\theta, r, z), \quad (33)$$

$\Phi_0^*(\theta, r, z)$ - комплексно сопряженная функция потенциала набегающих волн.

Выполнив интегрирование по переменной z и применив метод стационарной фазы [16] при вычислении интеграла по θ , получаем выражения для действительной и мнимой частей силы второго порядка $\Theta = \Theta_{Re} - i\Theta_{Im}$.

Ниже выписаны основные соотношения задачи, использованные в процессе численной реализации её решения на ЭВМ. В этих соотношениях использованы относительные (безразмерные) значения координат

$$x = \frac{L}{2} \cdot \bar{x}, y = \frac{B}{2} \cdot \bar{y}, z = T \cdot \bar{z} \quad \text{причём чётровка в дальнейшем изложении}$$

опущена, а также безразмерные коэффициенты и функции:

$$t = \frac{T}{L}, b = \frac{B}{L}, K = \frac{\omega^2}{g} T, K_B = \frac{\sigma^2}{g} T, u_0 = \frac{u}{r_B}, v_0 = \frac{v}{r_B}, \quad (34)$$

$$I = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(x) f(\xi) J_0 \left(\frac{K}{2t} |x - \xi| \right) d\xi dx, \quad f(x) = \int_0^1 \frac{\partial y(x, \zeta)}{\partial x} \exp[-K\zeta] d\zeta,$$

$$\begin{pmatrix} f_c \\ f_s \end{pmatrix} = \int_{-1}^1 \Phi(\xi) \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{K}{2t} \xi\right) \\ \cos\left(\frac{K}{2t} \xi\right) \end{pmatrix} d\xi, \quad \Phi(x) = \int_0^1 y(x, \zeta) \exp(K\zeta) d\zeta, \quad (35)$$

$$\Psi(x) = \int_0^1 y(x, \zeta) \exp[(K + K_B)\zeta] d\zeta,$$

$$\Theta_d^{cc} = \int_{-1}^1 \Psi(\xi) \left[\frac{K_B}{2t} \sin\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \cos\left(\frac{K}{2t} \xi\right) + \frac{K}{2t} \cos\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \sin\left(\frac{K}{2t} \xi\right) \right] d\xi;$$

$$\Theta_d^{sc} = - \int_{-1}^1 \Psi(\xi) \left[\frac{K_B}{2t} \cos\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \cos\left(\frac{K}{2t} \xi\right) - \frac{K}{2t} \sin\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \sin\left(\frac{K}{2t} \xi\right) \right] d\xi;$$

$$\Theta_d^{cs} = \int_{-1}^1 \Psi(\xi) \left[\frac{K_B}{2t} \sin\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \sin\left(\frac{K}{2t} \xi\right) - \frac{K}{2t} \cos\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \cos\left(\frac{K}{2t} \xi\right) \right] d\xi; \quad (36)$$

$$\Theta_d^{ss} = - \int_{-1}^1 \Psi(\xi) \left[\frac{K_B}{2t} \cos\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \sin\left(\frac{K}{2t} \xi\right) + \frac{K}{2t} \sin\left(\frac{K_B}{2t} \xi\right) \cos\left(\frac{K}{2t} \xi\right) \right] d\xi.$$

$$A = \Theta_d^{cc} - \Theta_d^{ss}; \quad B = \Theta_d^{cs} + \Theta_d^{sc}$$

$$u_0 = \frac{\frac{1}{4} b K I f_c - \frac{1}{2} \delta_1 f_s}{(\delta_1)^2 + \frac{1}{4} b^2 K^2 (I)^2}, \quad v_0 = \frac{\frac{1}{4} b K I f_s + \frac{1}{2} \delta_1 f_c}{(\delta_1)^2 + \frac{1}{4} b^2 K^2 (I)^2}. \quad (37)$$

Окончательные выражения для силы дополнительного волнового сопротивления на волнении имеют вид

$$\Theta = \sqrt{\Theta_{\text{Re}}^2 + \Theta_{\text{Im}}^2}$$

$$\frac{\Theta_{\text{Re}}}{\gamma r_{B^2} \frac{B^2}{L}} = -\frac{K^2}{2b(K+K_B)} \left[\sqrt{\frac{K^3}{K_B}} v_0 f_c + \sqrt{\frac{K^3}{K_B}} u_0 f_s - B \right]$$

$$\frac{\Theta_{\text{Im}}}{\gamma r_{B^2} \frac{B^2}{L}} = -\frac{K^2}{2b(K+K_B)} \left[\sqrt{\frac{K^3}{K_B}} u_0 f_c + \sqrt{\frac{K^3}{K_B}} v_0 f_s + A \right]. \quad (38)$$

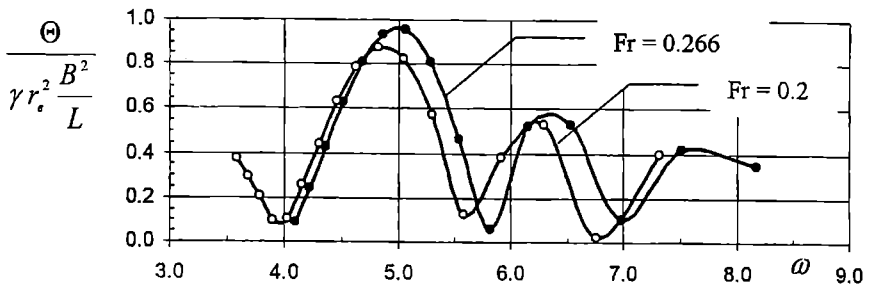


Рис. 1. Зависимость дополнительного волнового сопротивления судна на волнении от кажущейся частоты качки

По формулам (38) рассчитано дополнительное волновое сопротивление модели 60-й серии ($\delta=0,6$, $\frac{L}{B}=7,5$, $\frac{B}{T}=2,5$), совершающей только продольно-горизонтальную качку при ходе на встречном регулярном волнении.

На рис. 1 относительная величина $\frac{\Theta}{\gamma r_{B^2} \frac{B^2}{L}}$ дополнительного

волнового сопротивления на волнении показана в зависимости от кажущейся частоты колебаний ω для двух значений скорости хода, соответствующих $Fr=0,2$ и $Fr=0,266$.

Сопоставление этих результатов с экспериментальными данными Дж. Ньюмана [7], полученными для этой же модели, но в условиях только килевой и вертикальной качки, показывает, что максимальное значение дополнительного волнового сопротивления модели, испытывающей только продольно-горизонтальную качку, может составить до 18 % дополни-

тельного волнового сопротивления на волнении. Установившееся мнение о возможности полного пренебрежения рассмотрением продольно-горизонтальной качки в задачах динамики судна является ложным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородай И. К. и др. *Прикладные задачи динамики судов на волнении* Л.: Судостроение, 1989. – 259 с.
2. Хаскинс М. Д. *Гидродинамическая теория качки корабля*. М.: Наука, 1979. – 328 с.
3. Pinkster I.A. *Low frequency second order wave exciting forces on floating structures / Nederlands Ship Model Basin. Wageningen. – Netherland. № 650. 204 p.*
4. Salvesen N. *Second-order steady-state forces and Moments on Surface Ships in Oblique regular waves / International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, London, 1974. – P. 212-226.*
5. Faltinsen O.M., Michelsen F.L. *Motion of large structures in Waves at zero Froude numbers // International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves. London, 1974. – P. 91-106.*
6. Maruo H. *The drift of a body floating on waves // Journal of ship research. 1960. V. 4. № 3. P. 1-10.*
7. Newman J.N. *The drift force and moment on ships in waves // Journal of ship research. 1967. V. 11. № 1. P. 51-60.*
8. Havelock, T. H. *Drifting forces on a ship among waves, Philosophical magazine, 1943. – 133 с.*
9. Geritsma, J., Beukelman, W., *Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. International Shipbuilding Progress, 1972, 19, 217.*
10. Ankudinov, V. K. *The added resistance of a moving ship in waves. International shipbuilding Progress. 1972. 19. (220).*
11. Сизов В. Г. *К теории волнового сопротивления судна на регулярном волнении.* Вісник ОДМУ. – Одесса: № 3, ОДМУ, 1999. – № 3. – С. 20-39.
12. Воробьев Ю.Л. *О продольных колебаниях тонкого судна на глубокой воде // Прикладная механика АН УССР. 1979. Т. XV. № 6. С. 104-109.*
13. Воробьев Ю.Л. *Гидродинамические характеристики продольной качки судна на глубокой воде. – В кн.: Теория и практика модернизации и ремонта судов // Сб. научн. тр. ОИИМФ. – М.: ЦРИА Морфлот, 1981. – С. 5-14.*
14. Newman J.N. *The damping and wave resistance of a pitching and heaving ship // Journal of Ship Research. 1959. V. 3. № 1. P. 1-19.*
15. Newman J.N. *The exciting forces on fixed bodies in waves // Journal of Ship Research. 1962. V. 6. № 3. P. 10-17.*

16. Эрдейи А. Асимптотические разложения. М.: ГИФМЛ, 1962. – 127 с.
17. Короткин А. И. Присоединённые массы судостроительных конструкций. СПб.: Мор. вестник, 2007. – 447 с.

Надійшла 20.03.08

СОДЕРЖАНИЕ

Ученые

Одесского национального морского университета

ЛУБЕНОВ РОСТИСЛАВ ВИТАЛЬЕВИЧ - УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ, ИНЖЕНЕР	3
--	---

Морская гидротехника

Гришин В.А., Гришин А.В. СКЛОНЫ ОДЕССКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ	5
Гришин В.А., Гришин А.В. АНАЛИЗ ОПОЛЗНЕЙ НА СКЛОНАХ ОДЕССКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ	20

Эксплуатация морских портов

Андриенко А.О. МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРКА КРАНОВ МОРСКОГО ПОРТА	38
Бондаренко С.Н. ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ПОРТОВ (МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ)	46
Сторожев В.В. О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	57

Системы управления процессами

Мальцев А.С., Голиков В.В., Жуков Д.С. ОБОБЩЕННЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СОГЛАСОВАННОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕЛОВЕКА- ОПЕРАТОРА	65
Вычужанин В.В. АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СУДОВОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА	76
Ветошникова М.А. К ВОПРОСУ ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ БИЗНЕС- ЕДИНИЦ (СБЕ)	92

Конструкция и прочность судов

Лукаш Э.П., Олейников В.В., Партолога М.И. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ	105
Коноплев А.В., Стариков М.А. О КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ	115
Зайцев Д.В. АНАЛИЗ И РАСЧЕТ С ПОМОЩЬЮ МКЭ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОСОВОГО ГИБКОГО ОГРАЖДЕНИЯ ОТКРЫТОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ВИСЕНИЯ СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ	123
Галь А.Ф., Дубина М.А. ОСОБЕННОСТИ СПУСКОПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ	131

Теория и проектирование судов

Егоров Г.В., Ильницкий И.А. МНОГОЦЕЛЕВЫЕ СУХОГРУЗНЫЕ СУДА ДЕДВЕЙТОМ 7000 ТОНН ДЛЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ	137
Нечаев Ю.И., Сизов В.Г. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ СУДНА НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ	165
Романадзе Д.Д. ВОЛНОВЫЕ СИЛЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПРИ ПРОДОЛЬНО- ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КАЧКЕ СУДНА НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ	178

Наукове видання

ВІСНИК
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Збірник наукових праць

Випуск 24

*Українською, російською
та англійською мовами*

Видається з 1998 р.

*Свідоцтво про державну реєстрацію:
Серія КВ № 278
від 25.07.1997 р.*

Комп'ютерне верстання та розробка
оригінал-макету збірника – *Кобзева Н.Ю.*

Підписано до друку з оригінал-макету 01.07.08
Формат 70x108/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 12,1.
Замовлення № 317.

Адреса редакційної колегії та Видавництва ОНМУ:
65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34,
тел. 728-31-14