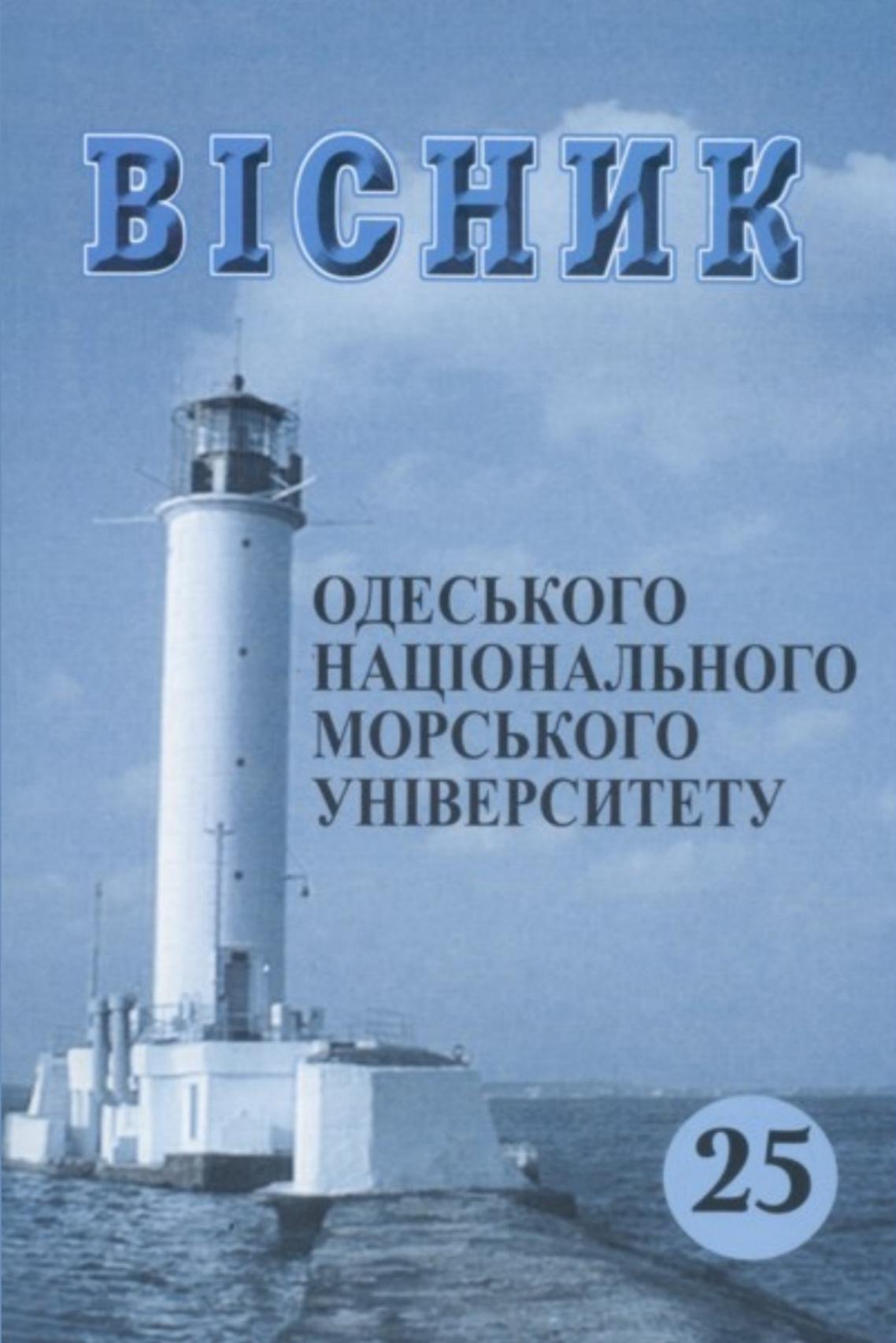


ВІСНИК



ОДЕСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

25

АНДРОНОВ ЛЕОНИД ПЕТРОВИЧ –
Ученый и Педагог
(28.08.1928-06.12.1994)



Л.П. Андронов родился в с. Каргашино Мордовской АССР в семье лесничего Петра Васильевича Андропова и учительницы Марии Сергеевны Андроновой. В 1945 г. поступил на судоводительский факультет Одесского высшего мореходного училища, который закончил с отличием в 1951 г. В 1951-1954 гг. учился в аспирантуре Одесского института инженеров морского флота (ОИИМФ) под руководством зав. кафедрой организации морских перевозок проф. В.И. Сухоцкого. По окончании защитил диссертацию «Тепло-влажностные и вентиляционные режимы трюмов сухогрузных судов и пути обеспечения сохранности перевозимых морских грузов» (ОИИМФ, 1954.).

В 1954-1974 гг. – ассистент, старший преподаватель, доцент кафедры организации грузовых работ ОИИМФ, активно участвующий в подготовке кадров, научной работе и общественной жизни.

Ученые

Одесского национального морского университета

В 1974-1986 гг. работал старшим научным сотрудником, начальником сектора, зав. отделом технологии перевозки опасных грузов Черноморского филиала Центрального научно-исследовательского института Морского флота (ЦНИИМФ). В 1988 г. вышел на персональную пенсию и продолжал работать в пожарно-технической части ВОХР Черноморского морского пароходства. Закончил жизнь в 1994 г. старшим научным сотрудником научно-исследовательского сектора ОИИМФ.

В 1963-1975 гг. – руководитель делегации СССР в Подкомитет по опасным грузам КБМ ИМКО (Лондон, Англия). В 1963-1972 гг. – руководитель делегаций СССР в Европейскую экономическую комиссию (ЕЭК) ООН (Берн, Женева, Швейцария). В 1972-1985 гг. – зам. председателя, председатель группы экспертов СССР в Комитете экспертов по транспортировке опасных грузов Экономического и Социального Совета (ЭКОСОС) ООН, (Женева, Швейцария). Благодаря этим и другим работам ОИИМФ становится головным учреждением в СССР по правилам перевозки опасных грузов и получает известность в мире. До сих пор на имя Л.П. Андронина для ОИИМФ приходят публикации ИМО (Международной морской организации), оплачиваемые ИМО как дань уважения активно работавшему ученому.

Л.П. Андронин награжден медалями «За трудовое отличие» (1970), «Ветеран труда СССР» (1988). Почетный работник морского транспорта (с 1978 г.). Автор монографий «Складские и стивидорные работы» (М.: Морской транспорт, 1962), «Перевозка опасных грузов морем» (М.: Транспорт, 1971). Автор учебника для вузов «Грузоведение и стивидорные операции» (1966, 1974, 1975). Этот учебник также был издан трижды на испанском языке (М.: Мир) для студентов Кубы и других стран Латинской Америки. Автор около 200 научных статей, научно-исследовательских отчетов, советских предложений в ИМКО, в Комитет экспертов ООН, 3 государственных стандартов (ГОСТ), соавтор «Правил морской перевозки опасных грузов – МОПОГ» (1963-1965 гг.), европейских «Правил перевозки опасных грузов по водным путям» (ВОПОГ), «Европейского соглашения о международной перевозке опасных грузов» (ДОПОГ), Рекомендаций (и Дополнений к Рекомендациям) ООН по перевозке опасных грузов.

Л.П. Андронов активно занимался научной и педагогической работой во славу ОИИМФ и нашей страны. Его научную школу продолжают многие кандидаты наук, некоторые из них стали докторами наук. Талантливый инженер, педагог и ученый, он писал стихи, любил петь русские и украинские песни, доброжелательно относился к людям и помогал им найти свой путь в науке и жизни. И теперь, 14 лет спустя после смерти, его тепло вспоминают ветераны ОИИМФ, ныне Одесского национального морского университета.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СОХРАНЕНИЯ СУДОВ СМЕШАННОГО РЕКА – МОРЕ ПЛАВАНИЯ

Систематизированы исторические сведения и экономические данные, которые позволили объективно проанализировать роль и значимость судов смешанного река – море плавания (ССП) в украинской и российской экономике, показана логика создания и совершенствования ССП в отечественных условиях, доказана необходимость не только сохранения данного класса судов, но и строительства новых судов этого типа, в том числе на украинских верфях.

Ключевые слова: проектирование, суда смешанного река-море плавания, внутренние водные пути, северный завоз, районы плавания, безопасность.

Старение судов смешанного река-море плавания (ССП), которыми оперируют украинские и российские судовладельцы, возрастающее число аварий с ними, а особенно трагические события 11 ноября 2007 года в Керченском проливе с гибелью четырех ССП возрастом от 30 до 50 лет, привели к появлению в обществе негативного отношения к этому классу судов, вплоть до заявлений об их полной непригодности к работе в морских условиях и о необходимости запрета их эксплуатации в море.

Безусловно, исследования всей совокупности причин происшедшего далеко не завершены, причем как всегда в такой ситуации речь идет не только об объективных причинах, таких как шторм с волнением, достигавшем на мелководье семиметровой высоты и сопровождавшимся сильным южным ветром, весьма редким для Керченского пролива, но и о влиянии человеческого фактора.

Монографии [1; 2; 4; 16], касающиеся основополагающих принципов создания ССП, относятся к раннему этапу истории судов смешанного плавания (до 1974 года). Целый период более позднего развития ССП не был отражен в научных публикациях, что во многом способствовало появлению абсолютно неверной оценки этого класса судов в последние годы.

Интересно отметить, что в послании Федеральному Собранию от 26 апреля 2007 года Президент Российской Федерации В.В. Путин отмечал, что «важнейшим фактором сокращения издержек в экономике должно стать развитие речных перевозок. Необходимо реализовать проекты по увеличению пропускной способности внутренних водных путей. В том числе – модернизировать Волго-Донской и Волго-Балтийский каналы. Предлагаю Правительству также проработать вопрос о создании международного

консорциума по строительству второй линии Волго-Донского канала. Эта новая транспортная артерия позволит кардинальным образом улучшить судоходное сообщение между Каспийским и Черным морями».

Послание подчеркивает главное назначение ССП – транзитная перевозка грузов с одного моря в другое через внутренние водные пути и с реки на море без перевалки в устьевых портах, в том числе перевозки между Черным морем и Каспием.

Целью настоящей статьи является систематизация исторических сведений и экономических данных, которые позволяют объективно проанализировать роль и значимость ССП в украинской и российской экономике, выявить логику создания и совершенствования ССП в отечественных условиях, показать необходимость не только сохранения данного класса судов, но и строительства новых судов этого типа, в том числе на украинских верфях.

Флот судов смешанного река-море плавания является активным участником экспортно-импортных перевозок и беспереvalочных каботажных перевозок, в том числе межбассейновых (табл. 1).

В 2002 году среди экспортно-импортных перевозок перевозки нефти и нефтепродуктов составили 37%, зерна и продуктов перемола – 14%, лесных грузов – 12%, химических и минеральных удобрений – 10%, черных металлов – 8%, угля и кокса, руды, строительных грузов – по 1%.

Особую государственную роль ССП играют при завозе грузов на Крайний Север, куда другими видами транспорта осуществить рентабельные перевозки просто невозможно.

Иногда говорят, что история судов типа река-море в отечественном судоходстве начинает свой отсчет с середины 60-х годов прошлого столетия, когда была создана единая глубоководная система внутренних водных путей европейской части СССР и появились массовые серии современных судов, пригодных для совершения таких рейсов.

Но это упрощенный взгляд – восточные славяне уже к IX веку освоили не только речные системы Восточной Европы, но и бассейны Черного, Азовского, Каспийского морей [9; 12]. Великий торговый путь или, как сейчас принято говорить, международный транспортный коридор «из варяг в греки», проходивший по внутренним водным путям Киевской и Новгородской Руси, через Неву, Ладогу, Волхов, Ильмень, Ловать, Днепр, мог существовать только при наличии судов, которые использовались как в Балтийском и Черном морях, так и на реках. Но уже тогда на развитие судоходства серьезное влияние оказывала позиция правительства. Например, новгородские торговцы сами практически не ходили на европейские порты, была организована перевалка с коггов Ганзейского союза на речные суда в Ладоге и устье Охты.

Напротив, в северном направлении (по будущей Северо-Двинской системе или по тем рекам и озерам, которые потом войдут в состав Беломорско-Онежского канала) на морских ладьях, шитиках, стругах, насадах, ушкуях новгородцы выходили в Белое море и далее в Ледовитый океан,

Теория и проектирование судов

собирая дань и занимаясь торговлей, так как Великий Новгород активно осваивал именно северо-восток, расширяя свое жизненное пространство.

Таблица 1

Суммарный объем перевозок судами смешанного река-море плавания и «северного завоза» [3; 7]

| Годы | Экспортно-импортные перевозки, млн. т | Завоз грузов на Крайний Север, млн. т |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1990 | 17,5 | нет данных |
| 1991 | 17,0 | нет данных |
| 1992 | 16,4 | нет данных |
| 1993 | 17,2 | нет данных |
| 1994 | 20,2 | нет данных |
| 1995 | 24,1 | 20,4 |
| 1996 | 24,5 | 14,5 |
| 1997 | 23,5 | 15,0 |
| 1998 | 19,0 | 12,2 |
| 1999 | 18,1 | 12,4 |
| 2000 | 20,4 | 14,2 |
| 2001 | 25,4 | 15,2 |
| 2002 | 29,3 | 13,3 |
| 2003 | 32,8 | нет данных |
| 2004 | 34,8 | 11,6 |
| 2005 | 35,1 | 12,0 |

Конечно, размеры и грузоподъемность этих судов были несравнимы с современными, представления о безопасности далеки от взглядов XX и XXI века, но уже тогда были понятны особенности ССП, связанные с путевыми условиями – мелководье, пороги, волоки, «отсюда легкость и малая осадка судов при достаточной грузоподъемности и дешевизне. Для морского судоходства использовались или доработанные речные суда (Киевская Русь) или, как это было, вероятно, в Новгородской земле, суда, построенные в иностранной (скандинавской) традиции» [9].

Северный морской путь активно использовался в XIX веке для переезда речных пароходов на реки Сибири. В 1878 году на Енисей по морю прибыл колесный пароход «Москва», в 1881 году – «Дельман». В 1905 году с целью завоза на Енисей материалов для железнодорожного строительства по северному пути туда прибыли два паровых лихтера грузоподъемностью по 750 тонн и четыре буксира, а также девять несамостоятельных барж.

Точно также пополнялся флот реки Лена. В 1879 году туда по морю прибыл пароход «Лена», в 1896 году – «Север».

Упоминание в официальной классификации об использовании речных судов в море имеется уже в первых Правилах Русского Регистра 1913 года, когда паровые суда разделили по классам: «М» – рейдовые (в море) и озерные; «Р» – речные нормального типа; «Л» – речные облегченного типа.

До Великой Отечественной войны в СССР строились малотоннажные морские суда, пригодные для бесперевалочной перевозки грузов из речных портов [4]. В 1935 году был принят в эксплуатацию лесовоз «Пионер», который работал на перевозке грузов с реки Свирь, Ладожского и Онежском озера на морские порты. Для этой же цели на Каспии использовали сухогрузы грузоподъемностью 1650 тонн типа «Азербайджанец», на Азовском море – шхуны грузоподъемностью 1150 тонн типа «Земляк», на Дальнем Востоке – сухогрузы грузоподъемностью 420 тонн и осадкой 2,8 м типа «Бия».

В предвоенные и послевоенные годы для смешанных перевозок широко применялись несамоходные баржи – лихтеры грузоподъемностью от 300 до 3000 тонн [2].

До появления танкеров смешанного плавания вывоз бакинской нефти осуществлялся с двумя перевалками – сначала на Астраханском морском рейде с морских танкеров на рейдовые лихтера (было создано особое рейдовое пароходство), затем в самой Астрахани – с лихтеров на речные баржи. В середине 30-х годов инженер А.Ф. Пустошкин предложил создать танкер для бесперевалочной перевозки нефти от Баку до Астрахани. Идея широко дискутировалась, в прениях принимали участие «отцы-основатели» советской кораблестроительной науки – академики А.Н. Крылов, Ю.А. Шиманский, проф. П.Ф. Папкович.

В 1936 году были проведены исследования сухогрузного судна для перевозки леса и хлопка на линии Астрахань – Баку – Красноводск, а также для вывоза бурых углей с полуострова Мангышлак.

Термин «северный завоз» тоже появился в 30-е годы, когда государство осуществляло поддержку арктических регионов с целью создания опорных военно-стратегических пунктов, разведки полезных ископаемых, поддержки коренных народов Севера.

Сразу после Великой Отечественной войны для ММФ начались поставки мелкосидящих сухогрузных судов дедвейтом 1100 тонн и осадкой 3,1 м типа «Тисса», предназначенных для работы в Черном море и по реке Дунай [4].

В Правилах Речного Регистра СССР (РРР) 1947 г. классификация речных судов была уточнена: класс «М» позволял выход в Белое море, Обскую губу, восточную часть Финского залива и Ладожское озеро; класс «О» – в Онежское озеро, Финский залив до Кронштадта и Астраханский рейд в Каспийском море; класс «Р» – в прочие озера и реки; класс «Л» – верхние плесы больших рек.

Начиная с 1947 года буксиры мощностью 400 л.с. и лихтеры грузоподъемностью 1000 и 2000 тонн Северо-Западного речного пароходства (СЗП) и Беломорско-Онежского пароходства (БОП) осуществляли регулярные перевозки лесных грузов с побережья Белого моря в порты советской Прибалтики. В 1950 году в Ленинград и Калининград было доставлено 163 тыс. тонн леса. В 1956 году – 370 тыс. тонн, в 1958 году – 577 тыс. тонн. Стальные и композитные лихтеры строились в Финляндии, причем позднее некоторые из них были переделаны в самоходные.

В Дунайском пароходстве, используя открытые баржи смешанного плавания грузоподъемностью 1150 тонн класса «М» РРР и морские буксиры, были организованы линии для перевозки руды из Херсона и Николаева в Измаил, Килию, Рени, а также некоторые болгарские и румынские порты на Дунае.

В 1946-1947 годах был организован массовый морской перегон речных судов, полученных по репарациям из Германии. Всего было доставлено 1536 судов общей грузоподъемностью почти 500 тыс. тонн. В дальнейшем такие перегоны стали обычным явлением для речфлота СССР, была организована Экспедиция спецморпроводки, основной работой которой стал перевод речных судов в Сибирь Северным морским путем.

Положительный практический опыт перегонов стальных судов позволил сделать вывод о принципиальной возможности эксплуатации таких речных судов в некоторых морских районах. Речные суда Волго-Донского пароходства (ВДП) стали заходить в порты Азовского моря без обычной, как прежде, перевалки груза в Ростове-на-Дону.

В 1949 году СЗП приступило к добыче и перевозке морского песка из Финского залива на стройки Ленинграда. В 1950 году было перевезено 360 тыс. тонн песка, в 1956 году – 300 тыс. тонн.

В Амурском пароходстве были организованы перевозки промышленных и продовольственных грузов из Благовещенска и Хабаровска на Сахалин без перевалки в Николаевске-на-Амуре, в годы Великой Отечественной войны осуществлялась перевозка нефти с восточного побережья Сахалина в Николаевск-на-Амуре.

Суда Ленского объединенного речного пароходства (ЛОРП) обеспечивали завоз грузов для населения и предприятий золотодобывающей и алмазной промышленности Якутии в прибрежные районы северных морей на реки Анабар, Яну, Индигирку, Оленек и Колыму (см. рис. 1 из [8]). Транспортная доступность улусов в бассейнах этих рек составляла всего лишь 44-60 дней в навигацию.

Впервые в отечественной практике морские районы каботажного плавания для речных судов были установлены в административном порядке в документе «Протокол совещания по вопросу установления границ прибрежного морского плавания, а также условий, которым должны удовлетворять суда внутреннего плавания для выхода в эти районы» (Межведомственные Протоколы) в 1952 и 1958 годах в связи с нехваткой

значенный для перевозки нефти и нефтепродуктов из морских портов Каспия на Астрахань, без перегрузки на рейде. За счет постройки серии таких судов к концу 50-х годов удалось ликвидировать рейдовые перевалки на Астраханском и Красноводском рейдах. Интересно отметить, что к постройке был принят только шестой вариант проекта, что наглядно характеризует накал дискуссий по обоснованию характеристик судов нового типа – судов смешанного плавания.

Однако танкеры типа «Олег Кошевой» (и их вторая серия – типа «Инженер А. Пустошкин»), а также близкие по концепции к ним сухогрузы типа «Инженер Белов» оказались не столь эффективными как ССП, так как не выбирали в реке значительную часть своей грузоподъемности.

Например, в 1964 году сухогруз типа «Инженер Белов» Каспийского пароходства вышел в пробный рейс из Ноушехра (Иран) в Щецин (Польша). При проходной осадке 3,0 м было взято на борт 1950 тонн жмыха (максимальная грузоподъемность 3700 тонн), рейс был совершен за 37,5 суток. В 1966 году были выполнены еще несколько рейсов, как через Волго-Балтийский путь, так и через Волго-Донской судоходный канал, примерно с таким же результатом. В итоге, суда этих типов весьма успешно работали на мелководные морские порты, но заходы на реку для них стали эпизодами [16].

Проектирование таких сухогрузных и нефтеналивных судов, пригодных для прямых перевозок между речными и морскими портами, на основе речных судов началось в конце 50-х годов. К строительству заводы приступили в начале 60-х годов.

С выходом в прибрежные морские районы стали эксплуатироваться новые на тот момент сухогрузы пр. 781 типа «Балтийский», пр. 791 типа «Волго-Балт», пр. 576 типа «Шестая пятилетка», пр. 1000/800 типа «Беломорский», пр. 21-88 типа «Калининград» (с рефрижераторной модификацией в виде пр. 21-89), танкеры пр. 558 типа «Волгонефть», пр. 576Т типа «ПавловГЭС» и нефтерудовозы пр. 1553. Суда проектов 781, 1553 имели класс Регистра СССР (ныне Российского морского Регистра Судоходства) с расчетной высотой волны 5 м, суда проектов 791, 558, 1000/800 – класс «М» Речного Регистра с расчетной высотой волны 3 м, суда проектов 576 и 576Т – класс «О» Речного Регистра с расчетной высотой волны 2 м.

С 1958 года для перевозки генеральных грузов и металла на линии Николаевск-на-Амуре – Москальво (Сахалин) Амурское речное пароходство использовало 9 сухогрузов пр. 576. Всего за период с 1958 по 1965 год было выполнено 770 рейсов и перевезено 524 тыс. тонн груза.

С 1961 года БОП вывел на линии Мезень – Таллин, Архангельск – Кандалакша, Архангельск – Таллин, Ленинград – Котка 11 сухогрузов проекта 1000/800 и 7 сухогрузов типа «Онежский». Только судами типа «Беломорский» в 1963-1965 годах было совершено 544 рейса и перевезено 468 тыс. тонн леса, угля и щебня.

В 1958-1964 гг. в ЛИВТе под руководством Ю.Л. Беляка была

проведена экспериментальная проверка прочности и мореходности речных судов в морских условиях. Первым был экспериментальный рейс сухогруза пр. 576 в Охотском море в 1958 году. Затем состоялись рейсы судов пр. 791, 576Т, 558 в Черном море и пр. 781 в Баренцевом море.

В 1962 году были осуществлены опытные перевозки нефтепродуктов на танкере проекта 558 типа «Волгонепфть» на Черном море.

В 1963 году Центральные курсы повышения квалификации при ЛИВТ приступили к подготовке штурманов морского плавания. В 1963-1964 годах курсы закончили 155 штурманов СЗП и БОП.

Первыми были капитаны судов «Балтийский-3», «Балтийский-6», «Профессор Керичев», «Волго-Балт б» и «XXII съезда КПСС». Эти и другие суда совершали смешанные река-море плавания, доставляя грузы в порты Балтики, Белого моря и Каспия.

В 1963 году сухогруз «Беломорский-14» (капитан Ю.А. Антонов) Беломорско-Онежского пароходства совершил первый в истории речного флота заграничный рейс из порта Шала (Онежского озера) в порт Котка (Финляндия).

В мае 1964 года Главное Управление Регистра СССР (РС) выработало для судов внутреннего плавания, выходящих в море, общие требования, во многом определившие идеологию технического наблюдения за этими судами со стороны классификационных обществ в будущем [1].

Суть этого подхода состояла в определении рационального соотношения между требованиями, которые надлежало выполнить до выхода в море и фактическими техническими возможностями как самих судов, так и экономической целесообразности таких действий.

Понятно, что самым простым было бы применение к речным судам, предназначенным для ограниченной эксплуатации в морских районах, всех требований Правил Регистра СССР к морским судам, но тогда исчезал экономический смысл такой эксплуатации, так как довести суда внутреннего плавания по всем составляющим до уровня судов неограниченного (океанского) плавания было экономически нецелесообразно.

Известно, что, например, для морских судов расчетными считались нагрузки, определяемые из условий их постоянной эксплуатации в высоких широтах Северной Атлантики.

Было ясно, что речным судам, выходящим в море в строго оговоренные районы и в строго назначенные периоды, не требовалось соответствие «морским» нормам в полном объеме.

Подход включал определение допускаемых ветро-волновых условий, при которых эксплуатация тех или иных проектов речных судов была бы безопасна с позиций прочности без внесения существенных изменений в конструкцию корпуса этих судов. Например, сухогрузные суда проекта 791 были допущены для работы в 20-мильной зоне прибрежных районов на линиях Кандалакша-Беломорск и Архангельск-Беломорск, причем выход в море разрешался при долгосрочном благоприятном прогнозе по волнению до 4 баллов при высоте волны до 2,5 м. Танкеры про-

екта 558 – на линии Ленинград – Таллин, Ленинград – Хельсинки, Астрахань – Махачкала, Астрахань – Гурьев и Керчь – Феодосия могли эксплуатироваться с такими же ограничениями.

Ранее (в 1958 году) Регистром СССР для сухогрузных судов проекта 576 на линии Хабаровск – Москальво были установлены ограничения по высоте волны до 2 м и по силе ветра до 4 баллов северных направлений и до 7 баллов южных направлений; танкеров проекта 576Т – линии Ленинград – Таллин, Астрахань – Гурьев при волнении до 3 баллов и высоте волны до 1,8 м. Сухогрузам проекта 1000/800 разрешалась эксплуатация для судов с двойным дном до высоту волны 2,2 м в Финском заливе и 2,5 м в Белом море, включая Мезень, а для судов без двойного дна до высоты волны 2 м в Финском заливе, 2,2 м в Белом море, 2 м до Мезени.

Морская эксплуатация допускалась только для речных судов, которые находились в хорошем техническом состоянии и получившим после освидетельствования РС свидетельства на годность плавания.

Отмечалось, что если по местным условиям плавание было безопасно на большем, чем 20-мильном удалении от берега, оно допускалось по согласованию с РС.

Остойчивость проверялась по требованиям РС, причем для судов проектов 558 и 791 – по II категории плавания, а для судов проектов 576 и 576Т – по III категории.

Радионавигационное оборудование судов, звуковые и световые сигналы, аварийное имущество должны были полностью соответствовать Правилам РС. На проектах 791 и 558 спасательное устройство и средства пожаротушения были доведены до уровня, принятого на морских судах того времени. Якорно-швартовное устройство было частично модернизировано (увеличены длины носовых якорь-цепей). На танкерах проекта 557 были установлены аварийные дизель-генераторы и модернизирована вентиляция грузовых танков.

На судах проекта 576, которые имели более значительные ограничения, дооборудование свелось к устройству брезентового закрытия крышек грузовых трюмов и изменению расположения сигнально-отличительных огней.

На судах, которые совершали международные рейсы (выходили до порта Хельсинки) были выполнены все требования Международных Конвенций.

Требовалось, чтобы на каждом судне имелись инструкции, учитывающие особенности эксплуатации их в море, в частности указания по управлению судном в неблагоприятных метеорологических условиях.

Экипаж судов комплектовался в соответствии с требованиями КТМ, командный состав должен был иметь соответствующие морские дипломы и хорошо знать условия плавания в данном районе. Командный состав проходил обучение на соответствующих краткосрочных курсах и получал так называемые «морские вкладыши» к своим дипломам.

В 1964 году танкеры «Важный» и «Волгонетфть-9» выполнили по

три рейса из Поволжья на Махачкалу с грузом сырой нефти туда и мазута обратно. В 1965 году уже 4 танкера проекта 558 стали работать на порт Махачкала, они за год совершили 26 круговых рейсов и перевезли 241 тыс. тонн нефти и нефтепродуктов.

В 1964 году на линии заграничного плавания в порты ГДР и Польши вышли суда СЗП. 7 октября 1964 года теплоход «Балтийский-4» перевез 1829 тонн металла из Череповца в Росток (ГДР), затем из Щецина уголь в Калининград. Всего за этот год суда СЗП перевезли по импорту более 100 тыс. тонн груза.

В 1964 году была организована линия Кандалакша – Череповец для перевозки угля и железнорудного концентрата, а также рудничной стойки и соли, на 14 судах проекта 791 типа «Волго-Балт». За два года было перевезено 795 тыс. тонн груза в 307 рейсах.

На линии Череповец – Хельсинки, Череповец – Росток, Череповец – Пехлеви работали суда проекта 781 типа «Балтийский». 9 мая 1965 года «Балтийский-8» перевез 2 тыс. тонн шихты для газового завода в Хельсинки.

В августе 1965 года судно проекта 576 «Клайпеда» доставило 2 тыс. тонн пшеницы из порта Ейск в порт Ленинград.

В конце ноября 1965 года «Балтийский-14» прошел с помощью ледокола Финский залив, 1 декабря взял в порту Лиепая на борт 1500 тонн кокса в порт Оденсе (Дания). Зимой 1965-1966 годов судно отработало на порты Дании и Швеции. В эту же зиму «Балтийский-26» работал в Каспийском море между Астраханью, Баку и Пехлеви (Иран).

В 1965 году экспортно-импортные перевозки осуществляли 8 сухогрузов СЗП, общий объем перевозок составил 92 тыс. тонн. В 1966 году работали уже 13 судов, которые перевезли 256 тыс. тонн грузов.

Общий объем бесперевалочных перевозок по речным и морским путям в 1965 году составил 5 млн. тонн грузов.

Суда Волго-Донского речного пароходства (ВДП) обеспечивали перевозку соли из Ахтубинска в Кандалакшу, Ригу и Таллин. В навигацию 1965 года впервые были осуществлены перевозки серного колчедана из Камбарки в Бердянск, а в обратном направлении – криворожской руды на Череповецкий металлургический комбинат.

В 1965 году танкер «Волгонефть-14» пароходства «Волготанкер» начал экспортные перевозки нефтепродуктов рейсом Ярославль – Хельсинки.

В 1968 году после ввода в строй восстановленного Сайменского канала суда река-море плавания начали перевозки угля, леса и нефтепродуктов через канал в порты Мустола, Лауритсала, Иматра. Первым был «СТ-804», затем пять судов типа «Беломорский» и ряд других судов.

В навигацию 1968 года Амурское речное пароходство организовало перевозки леса в порты Японии. Суда пароходства продолжают работать на линиях Благовещенск, Хабаровск – Сахалин, Магадан.

В 1968 году после подключения ССП к бесперевалочным перевозкам с Днепра в порты Черного моря и Дуная с обратной загрузкой приступил Главречфлот Украины (ныне АСК «Укрречфлот») [11].

В 1969 году суда смешанного река-море плавания ЗРП, СЗП, БОП, ВДП в зимний период перевезли более 1 млн. тонн грузов, что позволило значительно (на 13-23%) повысить эксплуатационно-экономические показатели работы судов этого типа.

В 1970 году объем перевозок смешанного река-море плавания вырос в 2 раза по сравнению с 1965 годом и составил 8,5 млн. тонн груза с грузооборотом 13,6 млрд. тонно-км.

Только из состава СЗП на международных линиях работали 43 судна разных проектов. Они перевезли 76% от всех грузов, транспортировавшихся в порты Европы судами МРФ без перевалки в устьевых советских портах.

К 1970 году усилилась роль речных пароходства восточных бассейнов, только в интересах нефтегазовой промышленности Западной Сибири за год было перевезено 4,55 млн. тонн грузов.

В 1971 году танкер «Волгонефть-55» начал бесперевалочные перевозки сырой нефти из Актау в Волгоград.

За решение уникальной научно-прикладной проблемы – создание и серийное строительство судов смешанного река-море плавания и осуществление бесперевалочных перевозок группе работников Минсудпрома и Минречфлота была присуждена Государственная премия СССР 1972 года.

В 1972 году начались перевозки гранитного щебня из Краснодарска на Волгу, ежегодный объем достиг 500 тыс. тонн.

Общий объем грузов, перевезенных судами Минречфлота в морском плавании, в 1972 году составил 23 млн. тонн. Начала работать уникальная Иранская линия – порты Ирана – порты северо-западной Европы, протяженностью 13,5 тыс. км, по транспортировке промышленных грузов, хлопка, жмыхов.

В Правила РРП 1972 года впервые были введены описания районов и сезонов морского плавания судов с классом РРП (М-СП, а в 1977 году – М-СП, М-ПР, О-ПР).

В 1973 году суда СЗП приступили к перевозкам грузов из портов Финляндии в страны Западной Европы (90 тыс. тонн).

В 1974 году международные рейсы стали осуществлять суда Волжского объединенного речного пароходства.

В 1975 году объем перевозок судами СЗП металла, шихты, кокса из Череповца в порты Балтики, генеральных грузов между портами Западной Европы, Прикаспия и Средиземноморья, леса и угля в Сайменском канале составил 2,2 млн. тонн.

Сухогрузы смешанного плавания ЛОРП проектов 0025, 292 типа «Сибирские», 1743, 1743.1, 1743.7 типа «Омские» перевозили генеральные грузы из Осетрово, каменный уголь из Джебарики – Хая и Сангары

на реки Яну, Колыму, Индигирку, совершая при этом значительные морские переходы [8]. В 1975 году объем перевозок смешанного река-море плавания составил 16,0 млн. тонн груза, в 1980 году – 18,5 млн. тонн, в 1985 году – 23 млн. тонн.

Как отмечается в работе [15], современный перечень морских районов, доступных для судов смешанного река - море плавания, приведенный в Правилах Речного Регистра 2004 г. и Бюллетенях к ним, пополнялся постепенно в течение последних 50 лет. Это расширение районов плавания отражалось в соответствующих Межведомственных Протоколах 1952, 1958, 1970, 1979, 1992, 1997 гг., а также в многочисленных дополнениях к ним. При этом соответствующие обоснования возможности эксплуатации судов в этих районах выполнялись либо путем обобщения опыта эксплуатации судов, т.е. директивно (Протоколы 1952 и 1958 гг.), либо (последующие Протоколы) с применением научных методик на основе анализа данных по волнению – расчетных, определенных по полям ветра; обобщающих статистические материалы инструментальных и визуальных наблюдений; использующих гидродинамические модели определения характеристик волнения по полям ветра и атмосферного давления. Протоколы согласовывались морским и речным ведомствами, а также морским и речным классификационными обществами – Регистром Судоводства Украины (РУ), РС и РРР [6].

В конце 80-х – начале 90-х годов начался новый этап развития ССП [6]. Как и ранее, причины нового всплеска интереса к этим судам носили сугубо экономический характер. С одной стороны, началась активная капитализация страны, появились частные судовладельцы, с другой – больше прав было передано речным пароходствам. Последние ранее не проявляли себя активно в международных перевозках и обладали большим количеством «исходного материала» (судов внутреннего плавания), который потенциально мог быть конверсирован в суда смешанного река-море плавания. Все это происходило на фоне разрушения централизованной системы внешнеэкономической деятельности и резкого дробления партий груза (до 1000-5000 т). Эти суда как нельзя лучше подходили для работы в рамках новых экономических условий.

Значительные преимущества ССП, находящихся под контролем отечественных судовладельцев, перед морскими судами, включая относительно меньший (на начало 90-х годов) средний возраст и меньшую остаточную стоимость, позволило им прочно занять место на рынке транспортных услуг, ранее принадлежавшее морским судам близкой грузоподъемности.

Рост количества судов смешанного плавания и морских ограниченных районов плавания в классах РС за счет модернизации речных судов был весьма бурным – до сотни единиц в год [6]. В итоге к началу 2003 года доля ССП составила 60% от общего числа транспортных судов с классом РС и более 90% – с классом РУ.

Более 80% судов, предполагаемых к постройке для отечественных

судовладельцев, также являются ССП, причем изменение этого соотношения в ближайшие годы не ожидается.

По состоянию на ноябрь 2007 года под наблюдением только российских классификационных обществ находились 2174 судна смешанного плавания, из них совершающих международные рейсы – 1190 судов. В том числе:

- в классе РС II 265 самоходных сухогрузных и нефтеналивных судов;
- в классе РС ПСП 584 самоходных сухогрузных и нефтеналивных судна;
- в классе РС ШСП 272 самоходных сухогрузных и нефтеналивных судна;
- в классе РРР «М-СП» 369 судов;
- в классе РРР «М-ПР» 372 судна;
- в классе РРР «О-ПР» 312 судов.

Помимо заграничных перевозок, суда смешанного река-море плавания обеспечивают выполнение важнейшей государственной задачи по снабжению северных регионов Российской Федерации, занимающих 12 млн. кв. километров или 70% территории страны. На этой территории в 1300 населенных пунктах проживают более 11 млн. человек (8% населения) и расположены все российские запасы алмазов, платины, молибдена, кобальта, 80% запасов нефти, 93% газа, 60% золота, меди и никеля. Запасы полезных ископаемых в этой части России оцениваются в 24 триллиона долларов США.

Например, на территории республики Саха (Якутия), площадь которой составляет 18% от общей площади Российской Федерации, проживают около 1 млн. человек.

Потенциал запасов полезных ископаемых оценивают в 5,5 триллионов долларов США, по объему валового регионального продукта Якутия вошла в первую пятерку субъектов страны [8]. При этом более 80% всех необходимых материально-технических ресурсов являются привозными [5].

Из-за сложных климатических условий и громадных расстояний, арктические территории не имеют развитой дорожной сети. Доставка необходимых для жизнедеятельности ресурсов – жидкого и твердого топлива, продовольственных и промышленных товаров, стройматериалов осуществляется морским и речным транспортом. Например, при протяженности железных дорог в Саха (Якутии) 630 км протяженность внутренних водных путей составляет 20 тыс. км, а участка Северного морского пути от устья реки Анабар до устья реки Колыма - 2963 км [8; 14].

Морские суда из-за малых глубин на бере не могут зайти в устья арктических рек.

Реки Енисей, Обь, Иртыш, Лена являются единственными транспортными артериями в меридиональном направлении между Транссибом и Северным морским путем. ССП из мест пересечения рек с железными

дорогами и далее по морю обеспечивают завоз грузов в пункты арктического побережья без перевалок и потерь.

Как отмечается в [5], «перевозки по Северном морскому пути на крупных океанских судах к устьям рек Яны, Индигирки, Оленеку, Анабару и ... Колымы обходятся во много раз дороже, чем на судах смешанного плавания из-за высоких тарифов на операции с проводкой за ледоколами и очень большими расстояниями до морских грузообразующих портов».

Там же приведен убедительный пример эффективности ССП по навигации 2001 года, когда были использованы одновременно три варианта доставки нефтепродуктов в Нижнеянск с указанием затрат на перевозку:

- морскими танкерами по маршруту Архангельск – бар реки Яна, перевалка на речной тоннаж с доставкой в Нижнеянск – 100 долларов за тонну;
- речными судами по маршруту Осетрово – Тикси, перевалка на танкера смешанного река – море плавания, переход Тикси – Нижнеянск – 47 долларов за тонну;
- прямым переходом танкерами смешанного река – море плавания Осетрово – Нижнеянск – 32 долларов за тонну (в период «большой» воды). Например, в навигацию 2007 года только ЛОРП доставило 1,8 млн. тонн грузов или на 20,3% больше, чем в 2006 году.

Всего, за короткий период навигации по северным рекам доставляется в среднем более 25 млн. тонн различных грузов, в том числе более 3 млн. тонн в смешанном река- море плавании.

Другим направлением использования ССП, является рейдовая перегрузка с ССП на морские суда, которая широко применяется на северо-западе и юге Российской Федерации.

В мировой морской практике (США, Англия, Дания, Норвегия, Египет и др.) такие операции называют схемой ship-to-ship или STS операции.

Схема STS перевалки с судов «река-море» плавания на морские суда нефтепродуктов с использованием танкеров-накопителей дает возможность формировать большие партии груза для морских танкеров, водоизмещением 100-150 тыс. тонн. В целях безопасности проведения STS операций разрабатывается Положение о рейдовых перегрузочных комплексах, обеспечивающее строгое выполнение требований экологического законодательства России и использование мирового опыта, что сводит к минимуму риски загрязнения окружающей среды.

Через рейдовые перегрузочные комплексы переваливаются также сера, зерно и минеральные удобрения. Создан устойчивый канал экспорта российских товаров, приносящий с помощью ССП стабильный доход в бюджеты Украины и Российской Федерации (табл. 2).

Следует отметить, что в настоящее время возникла важная задача по обеспечению строительства олимпийских объектов в городе Сочи.

Необходимо перевезти 100 млн. тонн груза, а пропускная способ-

ность береговой транспортной инфраструктуры составляет 4 млн. тонн в год при потребности в 16,5 млн. тонн. Поэтому положительное решение поставленной задачи невозможно без использования ССП, малые осадки которых позволят работать в условиях сочинского побережья.

Таблица 2

Объемы перевалки грузов на рейдовых перегрузочных комплексах морских портов в навигацию 2007 года

| Наименование порта | Вид груза | Объём, тыс. тонн |
|----------------------------|-----------|------------------|
| Кавказ, Керчь | мазут | 2715 |
| | сера | 2845 |
| | зерно | 897 |
| | удобрения | 187 |
| Кронштадт, Санкт-Петербург | мазут | 3717 |
| | удобрения | 590 |
| Новый порт | нефть | 250 |
| Тикси | нефть | 50 |

Уже решаемые и вновь поставленные перед флотом отечественных судов смешанного река-море плавания транспортные задачи являются настолько ответственными, что требуют обеспечения надежных перевозок и принятия мер по снижению риска эксплуатации ССП.

Данные статистики наглядно демонстрируют, что существующий флот смешанного плавания строился в основном в 70-80-е годы прошлого столетия. Распределение по типам судов с указанием среднего возраста для судов с классом РРР приведено в табл. 3.

Нормативные сроки службы судов задавались при проектировании и составляют обычно 25-35 лет при условии сохранения построечных ограничений по районам и сезонам плавания.

Для ССП, находящихся в европейской части бывшего СССР, с учетом изменений условий эксплуатации в последние 10-15 лет (существенное увеличение времени пребывания в морских условиях и при переменных нагрузках) ресурс корпуса, с точки зрения износов и усталости, вырабатывался быстрее, чем это предполагалось при проектировании. Результатом являются невиданные ранее объемы замен конструкций во время ремонтов, фактическое сокращение времени между докованиями судов.

Сложная ситуация для ССП сложилась в северных регионах. С одной стороны, навигационный период существенно меньше, чем в европейской части, скорость изнашивания в малосоленой воде Северного Ледовитого океана заметно ниже, поэтому ресурс расходуется меньше, но с другой стороны, календарный возраст оставшихся в этих регионах весьма судов значителен. Так, по данным Минтранса Республики Саха

Теория и проектирование судов

(Якутия) в 2001 году суда с возрастом до 10 лет составляли в ЛОРП 16,5%, большинство судов имеют возраст более 20 лет. 29% судов, эксплуатирующихся в республике, имеют ограничения по техническому состоянию.

Таблица 3

Численность и средний возраст судов смешанного плавания с классом PPP

| Тип судна | Класс судна | | |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | М-СП | М-ПР | О-ПР |
| | количество / средний возраст | количество / средний возраст | количество / средний возраст |
| Самоходные | | | |
| Пассажирские | - | 8 / 31,02 | 2 / 29,94 |
| Сухогрузные | 77 / 29,36 | 75 / 31,32 | 118 / 38,30 |
| Наливные | 87 / 29,46 | 82 / 33,75 | 26 / 32,00 |
| Буксирные | 41 / 24,67 | 75 / 29,57 | 51 / 33,04 |
| Несамоходные | | | |
| Сухогрузные | 72 / 23,37 | 42 / 22,93 | 21 / 27,58 |
| Наливные | 22 / 12,17 | 27 / 13,77 | 14 / 26,18 |
| Всех судов | 369 / 25,12 | 372 / 28,82 | 312 / 31,48 |

Согласно подпрограмме «Внутренний водный транспорт» Федеральной целевой программы «Модернизация транспортной системы России (2002-2010 годы)» предполагалось на I этапе в 2002-2005 годах осуществить постройку 127 грузовых судов суммарной грузоподъемностью 367 тыс. т и модернизацию 35 грузовых судов, на II этапе в 2006-2010 годы – постройку 195 судов общей грузоподъемностью 639 тыс. т и модернизацию 21 грузового судна.

Фактически за период с 2002 г. по 2007 г. было построено 127 судов смешанного река – море плавания и ограниченных районов плавания, в основном для экспортно-импортных перевозок (табл. 4). В среднем сдавалось 15-25 судов в год.

Большая часть нефтеналивных судов смешанного плавания имеет дедейт от 600 до 5000 тонн, поэтому от даты сдачи в 2008 году на них распространяются требования Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 по наличию и размерам двойного дна и двойного борта.

В составе флота поднадзорного PPP, танкеров, соответствующих требованиям МАРПОЛ 73/78 нет вообще. В классе РС ШСП из 27 судов только 2 (7%) будут соответствовать в 2008 году международным требованиям, в классе РС ПСП из 86 судов – 19 (22%), в классе РС II из 41 судна – 12 (29%), в классе РС I из 57 судов – 16 (28%).

Принимаются по меры по приведению танкеров в соответствие с международными требованиями. Так, ЛОРП выполнило по проекту 003RST06 Морского Инженерного Бюро модернизацию двух судов проекта Р77 с установкой второго дна и подъемом тронка, аналогичные работы осуществляет Енисейское речное пароходство на трех танкерах проекта Р77. Но пока общий объем работ крайне незначителен и не меняет ситуацию в целом.

Поэтому главной задачей является приведение в действие системы мер по обеспечению интегральной безопасности всего класса российских судов смешанного плавания.

Под интегральной безопасностью понимается безопасность эксплуатации всего класса судов смешанного плавания, которая обеспечивает снижение возможного отрицательного воздействия судов этого типа на социум, в первую очередь на людей и окружающую среду при сохранении экономической привлекательности и главных положительных свойства этого класса технических объектов. Для этого могут быть использованы различные варианты действий:

А. Управляемое снижение среднего возраста судов смешанного плавания, допущенных к выходу в морские районы (введение и последующее поэтапное снижение предельного для выхода в море возраста грузовых судов).

Б. Новое судостроение, в том числе строительство судов с использованием элементов существующих судов.

В. Обновление существующих судов, включая не только корпус, но и устройства, электрооборудование, другие элементы, обеспечивающие безопасность в морских условиях.

Г. Ужесточение требований к существующим судам за счет предъявления по требованиям дополнительных экологических классов «ЭКО». Следует иметь в виду, что дополнительные требования по экологической безопасности будут включать не только чисто технические предписания, но и организационно-технические меры.

Анализ трагедии в Керченском проливе показывает, что именно человеческий фактор сыграл в условиях уникального природного явления – шторма с ветром южного направления, свою отрицательную роль.

Кроме того, после введения в действие КТМ 1999 года и переноса условий эксплуатации судов классов «М-СП», «М-ПР», «О-ПР» из Межведомственного Протокола 1997 года в Правила РРР 2000 года, система Протоколов по согласованию районов и сезонов плавания перестала существовать. Таким образом, назначение районов и сезонов плавания ССП т.н. «малых» классов («М-ПР», «О-ПР»), которые существенно ограничены в своих технических возможностях, по сути, осуществлялось в рамках одного классификационного общества, без необходимого учета всего множества факторов, влияющих на вопросы безопасности.

Например, в рамках некой математической модели решалась задача определения безопасного нахождения судна в том или ином районе

Теория и проектирование судов

плавания, при этом учитывались расстояния до ближайших мест убежища, надежность этих убежищ при различных направлениях ветра, прогнозировались ветер и волнение.

Таблица 4

Фактическое пополнение транспортного флота Российской Федерации судами ограниченных районов плавания за период с 2002 г. по 2007 г.

| №№ п/п | Тип судна | Кол-во судов, ед. | Назначение |
|--------|--|-------------------|--|
| 1. | Танкер-продуктовоз пр. 005RST01 типа «Армада Лидер» дедвейтом 6500/4700 тонн | 10 | Экспортно-импортные перевозки |
| 2. | Танкер-продуктовоз пр. 19612 типа «СФАТ» дедвейтом 8000/4420 тонн | 5 | Экспортно-импортные перевозки |
| 3. | Танкер-продуктовоз пр. 19614 типа «Нижний Новгород» дедвейтом 5600/5100 тонн | 10 | Экспортно-импортные перевозки |
| 4. | Танкер-продуктовоз пр. 0201Л типа «Лукойл» дедвейтом 6600 тонн | 10 | Экспортно-импортные перевозки |
| 5. | Сухогруз пр. 005RSD03 типа «Карелия» дедвейтом 5500/3340 тонн | 10 | Экспортно-импортные перевозки |
| 6. | Сухогруз пр. RSD17 типа «Евро круизер» дедвейтом 6354 тонн | 5 | Экспортно-импортные перевозки |
| 7. | Сухогруз пр. 003RSD04 типа «Каспиан Экспресс» дедвейтом 3756/2584 тонн | 8 | Экспортно-импортные перевозки |
| 8. | Сухогруз пр. 006RSD05 типа «Палмали Трейдер» дедвейтом 6933/4535 тонн | 8 | Экспортно-импортные перевозки |
| 9. | Сухогруз пр. 01010 типа «Валдай» дедвейтом 5010/3800 тонн | 4 | Экспортно-импортные перевозки |
| 10. | Сухогруз пр. 00101 типа «Русич» дедвейтом 5190/3855 тонн | 9 | Экспортно-импортные перевозки |
| 11. | Сухогруз пр. RSD12 типа «Azov XL» дедвейтом 8048 тонн | 3 | Экспортно-импортные перевозки |
| 12. | Сухогруз пр. 005RSD06 типа «Челси» дедвейтом 5690/4942 тонн | 5 | Экспортно-импортные перевозки |
| 13. | Нефтеналивные баржи пр. 004ROB05 дедвейтом 4324/3897 тонн | 7 | Внутрирегиональные перевозки в классе М-ПР |
| 14. | Нефтеналивные баржи пр. 2731 дедвейтом 4500/3700 тонн | 7 | Внутрирегиональные перевозки в классе М-СП |
| 15. | Сухогрузные баржи пр. 03020, 03040 дедвейтом 5000/4130 тонн | 7 | Внутрирегиональные перевозки в классе М-ПР |
| 16. | Сухогрузные баржи пр. 82260 дедвейтом 2000 тонн | 10 | Внутрирегиональные перевозки в классе О-ПР |
| 17. | Буксиры мощностью 1400 л.с. пр. 07521 | 2 | Внутрирегиональные перевозки в классе ПСП |

Полученное теоретическое решение может быть вполне благоприятным, однако, как показал опыт, необходимо одновременно принимать во внимание возможность его реализации на практике в силу тех или иных причин.

Например, то, что в исследуемом районе фактически окажется гораздо больше судов, чем можно разместить в месте убежища, или, например, при нежелании властей этого порта убежища пустить суда.

Поэтому вопрос о районах плавания не может быть решен без участия морской администрации, причем, как с точки зрения всего класса судов (М-ПР, О-ПР), так и для конкретного судна (например, в форме выдачи Свидетельства на годность плавания самой администрацией флага или по ее поручению компетентным органом).

Другие организационно-технические меры, такие как служба аварийной поддержки, процедуры действий в нестандартных ситуациях и в ситуациях, опасных с точки зрения загрязнения окружающей среды и другие, также будут направлены на снижение последствий воздействия человеческого фактора.

Наиболее правильным подходом к обеспечению безопасности является вариант «Б» или путь строительства новых судов, но, как видно из объективной оценки темпов нового судостроения, быстрое решение поставленной проблемы по данному варианту невозможно – требуется достаточно длительный переходный период, когда главную проблему по отношению к экологии будут представлять существующие суда.

Кроме того, полномасштабное решение по пути «Б» невозможно без применения мер по пути «А», т.е. без введения предельного для морской эксплуатации возраста грузового судна смешанного плавания.

До тех пор, пока на рынке будут находиться старые суда, удовлетворяющие минимальным нормативным требованиям, практически не имеющие балансовой стоимости и работающие по минимальным фрахтовым ставкам, строительство новых судов будет нерентабельным.

В качестве первоочередных мер на начальном этапе можно рекомендовать гармонизировать национальные требования с международными (МАРПОЛ 73/78).

Например, запретить, начиная с даты постройки судна в 2009 году, на танкерах дедвейтом 600 тонн и более, не удовлетворяющих требованиям МАРПОЛ 73/78 в отношении наличия и размеров двойного дна и двойных бортов, перевозки в условиях Азовского, Черного, Балтийского, Каспийского и Белого морей перевозку нефти и нефтепродуктов с плотностью $0,90 \text{ т/м}^3$ (например, мазут).

Далее, к 2010 году распространить такие ограничения на все морские прибрежные районы Украины и Российской Федерации в отношении любых видов нефти и нефтепродуктов.

Исключение могут составить танкера, имеющие двойное дно и двойные борта и получившие дополнительный класс экологической безопасности «ЭКО».

Можно также рекомендовать ввести предельный возраст грузовых (сухогрузных и нефтеналивных) судов смешанного плавания, допущенных для выхода в морские районы, например, как представлено в табл. 5.

Предложения по предельному возрасту ССП

| Дата введения | Предельный возраст | Примечания |
|---------------|--------------------|---|
| 01.01.2009 | 40 лет | Исключение будут составлять грузовые суда, имеющие второе дно и двойные борта, с присвоенным дополнительным классом экологической безопасности «ЭКО» или прошедшие процедуру обновления в полном объеме |
| 01.01.2010 | 35 лет | |
| 01.01.2012 | 30 лет | |
| 01.01.2014 | 25 лет | |

Выводы

Отрицательные факторы, выявленные в последние годы – недостаточная износная и усталостная долговечность корпусов ССП, недостаточная скорость судов на волнении, нарушения установленных ограничений должны быть устранены как с помощью конструктивных мероприятий (модернизации судов, подкреплений корпусов, конверсии), так и путем проведения организационно-технических мероприятий по ужесточению контроля со стороны классификационных обществ, администраций порта и флага.

Анализ истории создания и совершенствования ССП позволяет сделать вывод о том, что суда такого типа прочно заняли свое место в экономике, обеспечивают решение жизненно важных для Украины и России задач.

Эти задачи являются настолько ответственными, что следует ставить вопрос не о прекращении эксплуатации ССП, а строительстве новых судов, с учетом накопленного опыта и новых технических возможностей [6]. Таким образом, представляется, что реальным будет комбинированный подход, который стратегически будет опираться на новое судостроение, с принятием мер по повышению безопасности существующих судов смешанного плавания и введением протекционистских ограничений по отношению к наиболее старым и потенциально опасным грузовым судам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляк Ю.Л. Освоение морских прибрежных районов судами внутреннего плавания. – М.: Транспорт, 1967. – 168 с.
2. Богданов Б.В. Морские и рейдовые баржи. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 296 с.
3. Внутренний водный транспорт России / Б.Ф. Новосельцев, Н.А. Ефремов, В.М. Воронин, В.И. Поспелов. – М., 2006. – 224 с.

4. Грузовые суда смешанного плавания / В.А. Евстифеев, П.Г. Варенов, В.В. Иконников, М.Г. Шмаков. – Л.: Судостроение, 1971. – 248 с.
5. Долженко Ю. Стратегия решения транспортных проблем экономики и жизнеобеспечения в бассейнах арктических рек Якутии // *Речной транспорт (XXI век)*. – № 3. – 2004. – С. 32-35.
6. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
7. Ефремов Н.А. Повышение перевозочного потенциала речного флота России в современных условиях. – М.: По Волге, 2004. – 186 с.
8. Зернов С. Транспортная недоступность Республики Саха (Якутия): мифы и реальность // *Речной транспорт (XXI век)*. – № 5. – 2007. – С. 46-53.
9. История северорусского судостроения / Г.Е. Дубровин, А.В. Окоороков, В.Ф. Старков, П.Ю. Черношвитов. – СПб.: Алетейя, 2001; М.: Институт Археологии Российской Академии наук, 2001; Российский институт культурологии Российской Академии наук, 2001. – 404 с.
10. Курдин В.А., Саратов В.Ф. Речной транспорт в 1946-1985 годах. – М.: Транспорт, 1987. – 544 с.
11. Малотоннажные сухогрузные суда дедеветом до 6000 тонн морского, прибрежного и смешанного «река-море» плавания: Периодический информационный обзор-справочник развития мирового судоходства и морских транспортных судов. – СПб.: ЦНИИМФ, 2000. – 70 с.
12. Речное судоходство в России / М.Н. Чеботарев, М.Д. Амузин, Б.В. Богданов, В.А. Иваницкий, Е.И. Честнов; Под ред. М.Н. Чеботарева. – М.: Транспорт, 1985. – 352 с.
13. Северо-Западное пароходство. История, события, люди (1923-2003). – СПб., 2007. – 337 с.
14. Смердов В.Н., Любимов В.И. Актуальные аспекты развития воднотранспортного комплекса республики Саха (Якутия) // *Сибирский научный вестник*. – Новосибирск: НГАВТ, 2001. – Вып. V. – С. 121-126.
15. Степанов О.З., Бутин А.П. Классификация морских районов для судов смешанного (река - море) плавания, в том числе пассажирских и разъездных: Отчет по договору № P26/04-5616 от 15.04.2004. – СПб.: ОАО «Инженерный центр судостроения», 2005. – 208 с.
16. Техничко-эксплуатационные качества судов смешанного плавания / В.Н. Анфимов, В.И. Асиновский, Ю.Л. Беляк, А.Ф. Видецкий и др. / Под ред. А.Ф. Видецкого. – М.: Транспорт, 1974. – 272 с.

Теория и проектирование судов

17. Cheetham Chris, Heinemann Max. European River Sea Ships. – Lloyd's Register, 2001. – 554 p.

Надійшла 23.05.08

О РОЛИ И ФОРМАХ ПРОЯВЛЕНИЯ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ В ПРОБЛЕМЕ СОХРАНЕНИЯ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ СУДНА

Рассмотрены многоплановая роль и различные формы проявления фактора времени в каждом из комплексов обеспечения непотопляемости. Изложен перечень характерных стадий и периодов процесса затопления аварийного судна, общие требования к системе мониторинга состояния судна. В качестве примера приведен векторный способ оценки времени сохранения аварийной плавучести судна.

Ключевые слова: непотопляемость, информационное, оперативное обеспечение, фактор времени.

В большинстве аварийных случаев, связанных с повреждением корпуса судна, фактор времени приобретает решающую роль в исходе аварии, а значит в судьбе судна и людей на его борту.

Известно, что непотопляемость судна обеспечивается четырьмя комплексами мер: конструктивным, превентивными, оперативным (борьба за непотопляемость) и объединяющим их системообразующим комплексом информационного обеспечения непотопляемости.

Временной фактор прямо или опосредовано проявляется в каждом из четырех комплексов

Так, на стадии проектирования в основу конструктивного обеспечения непотопляемости должен быть положен принцип, который был сформулирован академиком А. Н. Крыловым.

«При подразделении подводной и надводной частей надо руководствоваться расчетами влияния затопления отсеков на крен, дифферент и остойчивость.

Принцип подразделения должен быть таким, чтобы плавучесть утрачивалась ранее остойчивости или иначе, чтобы корабль тонул не опрокидываясь» [7].

Этот, принятый к руководству и реализуемый в течение столетия основной принцип конструктивного обеспечения непотопляемости имеет своей целью исключить скоротечную, измеряемую минутами и секундами гибель судна от потери аварийной остойчивости, упредив такой исход более продолжительным процессом потери запаса аварийной плавучести.

Этому же принципу должны быть подчинены все возможные предпринимаемые меры конструктивного, превентивного и опе-

оперативного обеспечения непотопляемости, к главным из которых следует отнести:

- исключение или сведение к минимуму условий несимметричного затопления отсеков путем устройства и использования управляемых и автоматических поперечных перетоков аварийной воды, мембранных закрытий в продольных переборках;

- оборудование судна системами самовыравнивания, быстрого и надежного закрытия всех вырезов в корпусе, срочного перекрытия клинкетных дверей с дублированием систем дистанционного управления;

- сохранение достаточного запаса предаварийной остойчивости.

Фактор времени принимает особую остроту в задачах информационного комплекса, главные из этих задач на судовом уровне состоят в следующем.

Для принятия принципиальных ответственных решений и последующих мер в условиях дефицита времени и психологического стресса, при переизбытке одной части и недостатке другой части информации, ее противоречивости капитан поврежденного судна с помощью этого комплекса должен безошибочно, срочно и незамедлительно получить ответы на четыре следующих вопроса:

1. Что повреждено и каковы границы затапливаемых отсеков.

2. Обречено судно или нет, т.е. сохранит ли оно минимум плавучести и остойчивости при этом повреждении в конечной или промежуточной стадии затопления отсеков. От этого ответа зависит главное решение – что спасать: экипаж или судно.

3. Какие меры окажутся наиболее эффективными и быстродействующими, а иногда единственными во втором случае, то есть – как спасать судно, если по характеру и району повреждения, проницаемости отсеков оно технически не обречено.

4. Каков временной предел эффективности принимаемых мер, а в особо опасных случаях каким временем располагает капитан для спасения людей.

По сути, из-за неопределенности ответов на второй и третий вопросы и, как следствие, спонтанных, неверных, часто запоздалых решений капитана, а значит и последующих действий его и экипажа, нередко терялась реальная возможность спасти от гибели поврежденное судно, человеческие жизни.

Ответ на четвертый вопрос осложнен многообразием ситуационных условий, а в целом задача прогнозирования динамики процесса и времени снижения аварийной плавучести и остойчивости до полной их потери даже в статической постановке при всей ее остроте и сегодня остается проблемной.

К основным трудностям при ее решении даже для реальных условий (оператор внутри ситуации) прежде всего следует отнести:

- недостаточность информации у капитана о предаварийных запасах плавучести и остойчивости судна;

- условность и несовершенство действующих критериев предельного состояния аварийного судна;

- отсутствие на судах средств отслеживания (мониторинга) параметров текущего состояния посадки и остойчивости аварийного судна, скорости их

изменения.

Имеющаяся на всех судах в соответствии с требованиями классификационных обществ стандартная «Информация о непотопляемости» (Damage Stability Information) не помогает в большинстве случаев ответить прежде всего на основной второй вопрос, так как содержит дискретную информацию для ограниченного числа виртуальных вариантов загрузки судна.

Для ответа на третий вопрос в «Информации» обычно приведен общий перечень рекомендованных мер, но не всегда указаны значимость каждой и необходимая временная последовательность их выполнения.

Ответ на четвертый вопрос в «Информации» вообще не предусмотрен.

Неразрешенной до наших дней проблемой остается прогнозирование интервалов времени процессов потери (сохранения) аварийной плавучести и остойчивости. Разнообразие конструктивных особенностей судов, характеристик района затопления, начальных эксплуатационных и внешних условий, то есть предаварийное состояние судна и гидрометеорология в каждом случае конкретизируют задачу.

Но в любом случае эти процессы необходимо и целесообразно рассматривать как совокупность или последовательность отдельных характерных степеней затопления, промежуточных состояний судна и соответствующих им временных интервалов.

По меньшей мере можно обозначить следующий ряд характерных временных интервалов процесса затопления судна в статической постановке на тихой воде:

- время затопления отсека до момента равновесного состояния (МРС), то есть до момента совпадения уровней воды внутри отсека и за бортом;
- время до момента полной потери аварийной плавучести – по нормативу до момента входа в воду предельной линии погружения, т.е. до момента предельного состояния (МПС);
- время начала и период временного максимального снижения остойчивости в промежуточной стадии затопления отсека при наибольшем отрицательном влиянии на остойчивость свободной поверхности влившейся воды;
- время до момента наступления критического угла крена при несимметричном затоплении отсеков (нормируемого угла крена – 12° или угла заливания);
- время до момента, когда опрокидывание судна в случае несимметричного затопления и при статическом кренящем моменте становится неизбежным ($M_{кр} > M_{опр}$).

В динамической постановке задачи оценки состояния поврежденного судна, времени сохранения его плавучести и остойчивости резко усложняются, приобретая вероятностный характер при качке и заливаемости судна в штормовых условиях. Фактор времени в таких вероятност-

ных процессах, как и в любых процессах, играет основную роль независимой координаты.

Нередко при физическом и математическом моделировании случайных процессов и явлений время служит мерой надежности в форме критериев времени наработки на отказ или числа отказов в единицу времени.

Такие критерии, например, использовались в исследованиях опрокидывания моделей поврежденных судов в условиях ветра и нерегулярного волнения [8].

Отдельную проблему представляет учет влияния поступившей в корпус аварийной воды на динамику поведения судна. Известны лишь немногочисленные исследования в этой области для неповрежденных судов.

Даже самая простая задача прогноза и оценки времени симметричного статического затопления отсека прямоугольной формы в средней части судна требует ряда исходных данных, точное определение которых часто невозможно, затруднительно или требует неприемлемых в условиях аварии затрат времени.

Этот ряд данных составляют: положение и размеры пробоины, ее площадь, коэффициент проницаемости затапливаемого отсека, величина общего запаса плавучести и полнота его использования (эффективный запас плавучести) до нормированной границы – момента входа в воду предельной линии погружения или отверстия в корпусе, интенсивность фильтрации забортной воды в смежные с поврежденным отсеки.

Для упомянутого выше простого случая процесс и время t затопления отсека через пробоину условно делится на две стадии: затопление до уровня пробоины (свободное падение воды), время процесса t_1 и затопление отсека от уровня пробоины до уровня аварийной ватерлинии (наличие гидростатического подпора), время процесса t_2 [6]

$$t = t_1 + t_2;$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2}{g} \frac{V_0}{\sigma\varphi T_0}} (\sqrt{T_0 - Sh\alpha\mu} - \sqrt{T_0 - h});$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{2}{g} \frac{1}{\sigma\varphi T_0}} (\sqrt{T_0 - Sh\alpha\mu}),$$

где φ – коэффициент истечения жидкости, $\varphi = 0,6$;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

γ – плотность забортной воды, т/м³;

q – число тонн на 1 см осадки, т/см;

μ – коэффициент проницаемости отсека;

S – горизонтальная площадь затопленного отсека, м²;

h – высота центра пробоины над основной плоскостью, м;

a – площадь пробоины, м²;

T_0 – предаварийная осадка в месте расположения пробоины, м;
 V_0 – объемное водоизмещение судна до получения пробоины, м³;

$$\sigma = \frac{1}{S} - \frac{\gamma}{q} \quad \text{– коэффициент величины отсека.}$$

Анализ возможных подходов к решению задачи показал, что в условиях аварии наиболее просто и относительно точно и быстро можно прогнозировать время потери плавучести судна при двух условиях:

- если удастся измерить скорость приращения водоизмещения dV/dt , т.е. скорость потери запаса плавучести, которая как мера интенсивности поступления воды суммирует влияние всех ниже перечисленных факторов;

- если располагать значением эффективного аварийного запаса плавучести $V_{эф}$, до величины его предельного значения.

Известность величины dV/dt исключает необходимость установления площади и глубины погружения пробоины, коэффициента проницаемости отсека, интенсивности фильтрации воды в смежные отсеки, а также учитывает работу осушительных насосов, так как эта величина является интегральной для всех перечисленных факторов.

Естественно, что она может изменяться по времени в некоторых пределах, так как с погружением пробоины повышается скоростной напор поступающей воды, а внутри трюма может изменяться по высоте его коэффициент проницаемости.

Для определения скорости затопления, а значит и периода времени до момента наступления характерного состояния судна можно наглядно, эффективно и достаточно точно применить векторный способ, предложенный в работах [1,3].

В основе способа использована расширенная диаграмма осадок конечностей в форме Петерсена (в осях $D - M_x$) в качестве поля состояний посадки и плавучести судна в эксплуатационных и аварийных условиях.

Для определения величины $V_{эф}$ и решения аварийных задач обычную диаграмму Петерсена предложено расширить вверх на всю область возможных аварийных посадок судна, ее верхней границей служит линия DEF , отражающая в принятых координатах образ линии предельного погружения судна (например, палубную линию с учетом седловатости или параллельную ей нормированную линию минимального надводного борта F_{min} , в частности, отмененного в прошлом норматива ($F_{min} = 76$ мм), (рис. 1).

Область диаграммы ниже линии DEF означает поле состояний судна с переменным запасом эффективной плавучести и с максимумом этого запаса в точке E , соответствующей предельной аварийной посадке судна

без дифферента. Величина запаса измеряется проекцией линии AE на шкалу водоизмещения.

Области, расположенные выше линии DEF и ограниченные линиями DKE и EMF соответствуют состояниям судна с неэффективным запасом аварийной плавучести.

Сущность предложенного векторного способа состоит в следующем:

1. Процессу затопления каждого из главных водонепроницаемых отсеков на диаграмме посадок соответствует постоянный по направлению и переменный по длине вектор изменения посадки с началом в точке A_i , отвечающей предаварийной посадке ($i = 1 - \infty$).

При условном поочередном затоплении n отсеков образуется семейство из n векторов с общим центром O . Численным анализом показано, что с приемлемой для практики точностью направление вектора для каждого отсека можно считать постоянным, что соответствует допущению о постоянстве абсциссы центра затопленного объема отсека при любом уровне его заполнения.

Отмечается незначительный поворот векторов для концевых отсеков и при очень больших дифферентах. С учетом этого допущения для каждого судна, разделенного на n отсеков, можно построить *векторную матрицу* из n постоянно направленных векторов (*векторный «веер»*) с общим центром – полюсом O . На рис. 1. приведена векторная матрица корпуса судна, разделенного на четыре главных водонепроницаемых отсека.

В приведенном примере полюс матрицы O помещен в конкретную точку A , соответствующую предаварийной максимальной средней осадке судна в полном грузу ($T_{cp} = 5,1м$) без дифферента.

Длина каждого вектора зависит от предаварийной посадки судна с соответствующим ей запасом плавучести и от коэффициента проницаемости поврежденного отсека.

Оперативным полем состояния посадки и плавучести для прогнозирования возможных вариантов затопления в конкретном рейсе, для отслеживания состояния посадки и ее регулирования в реальном случае повреждения служит диаграмма Петерсена, выведенная на экран монитора.

Полюс матрицы O совмещается с исходной точкой A , отвечающей предаварийному состоянию посадки судна. Заблаговременно по стандартной программе рассчитываются аварийные осадки носом и кормой при поочередном возможном затоплении каждого из отсеков с визуализацией отвечающих им точек B_n на векторных линиях каждого отсека на поле диаграммы (рис. 1).

Конечное состояние судна при затоплении n -го отсека определится положением точки B_n , а длина каждого вектора AB_n выражает изменение посадки в конечной стадии затопления отсека.

Рассчитанное положение каждой из точек B_n зависит от исходной посадки судна, параметров затопленного отсека, его коэффициента про-

нищаемости. Продление линии вектора изменения посадки при затоплении n -го отсека до пересечения ее в точке C_n с нанесенной на диаграмме линией DEF предельного погружения (состояния) судна образует вектор $B_n C_n$, проекция которого на вертикальную ось водоизмещения выражает оставшуюся величину эффективного аварийного запаса плавучести $V_{эфн}$ при затоплении n -го отсека.

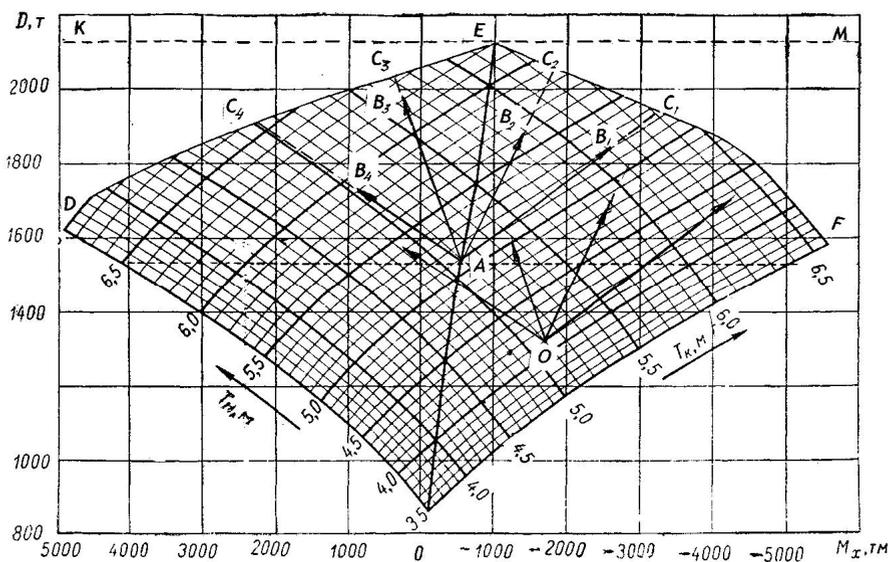


Рис.1. Определение аварийной посадки судна векторным способом при возможном затоплении каждого из четырех отсеков

Естественно, что для каждого из условно затопленных отсеков положение точки C_n и величины $V_{эфн}$ будут различными;

При условии $AB_n > AC_n$ предельное состояние МПС наступает ранее равновесного МРС и это означает, что по нормативу входа в воду предельной линии погружения судно теряет плавучесть. Условия характерны для состояния судна в грузу и высокой проницаемости поврежденного отсека.

При условии $AB_n < AC_n$ равновесное состояние МРС наступает ранее предельного МРС и судно останется наплаву с остаточным запасом аварийной плавучести $V_{эфн}$ равным проекции вектора $B_n C_n$ на ось водоизмещения. Характерные случаи состояния – судно недогружено или в балласте, а также при низкой проницаемости поврежденного отсека.

Для определения интервалов времени процесса до наступления характерных моментов затопления МРС или МПС необходимо снимать по показаниям индикатора осадкомера значения текущих осадок T_n

и T_k с интервалом в 1 минуту и, отслеживая их на линии вектора поврежденного отсека, определить его минутное приращение ΔAB_n [4].

Тогда интервалы времени в минутах до наступления моментов МРС и МПС, т.е. t_{MPC} и t_{MPC} соответственно определяются из отношений

$$t_{MPC} = AB_n / \Delta AB_n ; \quad t_{MPC} = B_n C_n / \Delta AB_n .$$

Операцию определения времени выполняет специальная программа для бортового ПК, в которую для расчета величин ΔAB_n необходимо вводить измеренные текущие значения осадок T_n и T_k ...

Предложенный метод может быть использован и в случаях затопления двух смежных или несмежных отсеков, для чего необходимо выполнить предварительно на диаграмме осадок сложение векторов затопляемых отсеков и далее в расчетах использовать вектор их равнодействующей. Сущность и правомочность такого метода векторного сложения показана в работе [3].

Важное достоинство предложенного векторного способа состоит в его возможности визуализировать поле состояний судна, а значит и отслеживать динамику изменения его посадки и эффективного запаса аварийной плавучести.

В заключение следует отметить, что возможность прогноза и оценки временных интервалов процесса затопления отсеков поможет капитану ответить на основной вопрос – что спасать, судно или экипаж, и после этого принять главное решение с большей обоснованностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь В. М. *Оперативный планшет для оценки посадки, остойчивости и непотопляемости судна // Теория и практика модернизации и ремонта судов // Сб. научн. трудов ОИИМФ. – М.: ЦРИА Морфлот, 1981. – С. 29-35.*
2. Бондарь О.В. *О проблеме фактора времени в задачах сохранения непотопляемости судна // Матеріали науково-методичної конференції «Підвищення безпеки управління суднами під час морських перевезень». – Одеса: ОНМА, 11-12 жовтня 2007. – С. 26.*
3. Бондарь В.М. *О представлении меры непотопляемости судна в форме суммы составляющих по отдельным отсекам // Современные проблемы судостроения и судоремонта: Сб. научн. трудов ОИИМФ. – М.: Мортехинформреклама, 1991. – С. 22-25.*
4. Бондарь В. М., Бондарь О. В. *К прогнозу времени сохранения плавучести поврежденного судна // Судовождение: Сб. научн. работ ОГМА. – Вып. 2. – Одесса: Латстар, 2000. – С. 29-36.*

5. Бондарь О.В. Временной фактор при спасении поврежденного судна // Тезисы симпозиума «Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации судов». Одесса. 9-10 апреля 2008.
6. Конопелько Г. И. Динамика процесса затопления отсека через пробоину // Методы и технические средства морской навигации: Сб. научн. трудов ЛВИМУ. Л., 1986. – С. 16-21
7. Крылов А.Н. Телеграмма адмиралу С.О. Макарову: Мои воспоминания. – Л.: Судостроение, 1984. – С. 124-126.
8. Маков Ю.А., Лапко Л. А. и др. Исследование опрокидывания аварийного судна в условиях ветра и волнения // Мореходные качества прмысловых судов: Труды КТИРПХ. – Калининград. Вып. 81. – 1979. – С. 45-49.

Надійшла 10.06.08

УДК 624.154:629.124.74

С.В. Бугаєв

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ХОДОВИХ ЯКОСТЕЙ ПЛАВАЮЧОЇ МАШИНИ ПРИ РУСІ ПО ВОДІ

Розглянуто взаємодію плаваючої машини з водою при русі, запропонована математична модель для визначення сил і моментів, діючих на корпус машини. Розроблений метод розрахунку ходових характеристик машини при русі по воді.

Ключові слова: *плаваюча машина, опору води, водне середовище, ходовий диферент.*

Плаваючі машини (ПМ) – досить поширений вид колісної і гусеничної техніки різноманітного призначення, яка ефективно використовується у військових справах та в різних галузях народного господарства. Одним з найважливіших якісних показників для ПМ є їхня спроможність рухатися по складним ланкам місцевості, бездоріжжю і по воді.

Як показав аналіз літературних джерел [1-8], у теперішній час відсутнє теоретичне рішення визначення опору води руху ПМ, яке б базувалося на вивченні фізичної картини взаємодії машини з водним середовищем. Існуючі методи рішення цієї задачі не дають належної точності, що веде до конструктивних помилок при розробці таких машин. Тому виникла необхідність у проведенні комплексних досліджень ходових характеристик плаваючих машин.

У роботах, присвячених цій проблемі, частіше за все розглядається загальний випадок прямолінійного руху ПМ по спокійній воді. Прийнято вважати, що моменти, які виникають у всьому інтервалі часу руху ПМ мало впливають на зміну її посадки на воді, тому часто в розрахунках їх не враховують. Таке припущення значно спрощує розрахунок ходових якостей ПМ, тому що до уваги беруть тільки дві сили: опору води руху ПМ і тяги водохідного рушія. На цих припущеннях базуються відомі методи розрахунку руху ПМ по воді. Найбільш поширені методи визначення опору води руху ПМ це є методи Н. І. Груздева [2], П. В. Аксьонова, Ю. А. Кононовича [2], А. П. Степанова [1; 3; 7], Л. Г. Бархударова, В. В. Киселевського [4] і Н. М. Бородіна [6]. Але, як показали дослідження [5; 9; 10; 11], вони мають значні розбіжності з даними експериментів.

Труднощі визначення опору води руху ПМ викликано дуже складною і поганообтічною формою її підводної частини і нелінійністю залежності опору води від швидкості руху машини.

Аналіз наукових праць [1-8] по вивченню опору води руху ПМ показує, що у подальшому дослідження повинні бути направлені на додаткове вивчення чинників впливу, з урахуванням яких слід розробити метод розрахунку опору води руху ПМ.

Таким чином, задача дослідження полягає у: розробити розрахункові схеми та математичні моделі взаємодії ПМ з оточуючою водою, які б дозволили визначити сили і моменти, що діють на корпус машини. На базі цих досліджень треба розробити методи розрахунку ходового диференту ПМ та її буксировочного опору з урахуванням геометричних розмірів машини, її ходового диференту, швидкості руху при різних гідрологічних умовах.

Як показали досліди [12], при русі ПМ по воді деформується навколишня поверхня, виникає диферент машини внаслідок перепаду тиску води в носовій і кормовій її частинах, що веде до виникнення циркуляції з носу до корми під корпусом ПМ. Результируючий гідродинамічний тиск на днище машини веде до появи диферентуючого моменту на ніс і зміни посадки машини. Ігнорування цього явища веде до неточності визначення опору води руху ПМ.

Для аналізу ходових якостей ПМ (рис. 1) прийнято, що машина рухається прямолінійно, рівномірно по спокійній воді з використанням постійної потужності двигуна. Машина симетрична відносно подовжньої вертикальної площини. У подальшому будемо розглядати тільки сили, які впливають на прямолінійний рух ПМ в залежності від швидкості її руху.

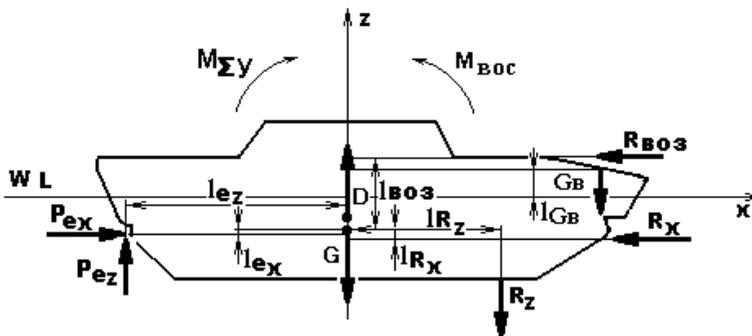


Рис. 1. Схема сил і моментів, що діють на машину

На машину при прямолінійному русі по спокійній воді діють наступні сили: сила ваги (G), плавучості (D), тяги водохідного рушія ($Pe = Pe_x + Pe_z$), опору води руху машини ($R_x = f(v)$), гідродинамічна сила R_z , опору повітря ($R_{воз}$), сила від появи води на носовій частині ПМ ($G_{в}$), (сила інерції R_j , у розглянутому випадку $R_j = 0$). Ці сили приводять до появи моментів: моменту $M_{\Sigma y}$, який виникає від невідповідної дії сил G і D та визначає посадку ПМ на тихій воді; моментів M_{Pe_x} , M_{Pe_z} відносно осей

Ox і Oy від сили Pe ; моментів M_{R_x} , M_{R_z} від гідродинамічних сил R_x і R_z відносно Ox і Oy ; моменту $M_{R_{\theta 03}}$ від аеродинамічної сили; моменту $M_{G_{\theta}}$ від G_{θ} ; моменту $M_{\text{Двост}}$, що виникає внаслідок додаткового заглиблення об'єму ПМ при вході у воду. Він компенсується сумарним диферентуючим моментом при русі ПМ, тобто

$$M_{\text{Двост}} = M_{\text{Диф}} = M_{Pe_x} + M_{Pe_z} + M_{R_x} + M_{R_z} + M_{R_{\theta 03}} + M_{G_{\theta}}. \quad (1)$$

В свою чергу сумарний диферентуючий момент приводить до зміни посадки машини на воді і кута диференту, який дорівнює сумі кутів статичного ($\alpha_{\text{ст}}$) і динамічного ($\alpha_{\text{дин}}$) диференту

$$\alpha_{\text{диф}} = \alpha_{\text{ст}} + \alpha_{\text{дин}}. \quad (2)$$

Рівняння (2) визначає сумарний ходовий диферент ПМ $\alpha_{\text{диф}} = f_v(M_{\Sigma\text{диф}})$. У розглянутому випадку сила тяги водохідного рушія дорівнює сумі всіх сил опору води руху ПМ

$$Pe = R_x + R_{\theta 03}. \quad (3)$$

При цьому виконується рівність по модулю між сумарними моментами – відновлюючим ($M_{\Sigma\text{вост}}$) і диферентуючим ($M_{\Sigma\text{диф}}$)

$$M_{\Sigma\text{вост}} = M_{\Sigma\text{диф}}. \quad (4)$$

Вираз (4) можна записати як

$$M_{\Sigma\text{вост}} = M_{\text{Сдиф}} + M_{Pe_x} + M_{Pe_z} + M_{R_x} + M_{R_z} + M_{R_{\theta 03}} + M_{G_{\theta}}, \quad (5)$$

Таким чином, ходові якості ПМ залежать від сили тяги водохідного рушія Pe , яка у свою чергу, залежить від потужності двигуна ($P_{\text{ДВ}}$) і його ефективності ($\eta_{\text{ВД}}$), а також від опору води (R_x) та положення машини на воді (загального диференту)

$$\alpha_{\text{диф}} = Rx(f(v, \alpha_{\text{диф}})). \quad (6)$$

Аналіз ходових характеристик ПМ можна зробити за допомогою рівнянь

$$P_{\text{ПМ}}(f(P_{\text{ДВ}}\eta_{\text{ВД}})) = Rx(f(v, \alpha_{\Sigma\text{диф}})) + R_{AA}(f_v(S_{AA})); \quad (7)$$

$$\alpha_{\Sigma\text{диф}} = \alpha_{\text{ст}} + \alpha_{\text{дин}}(f_v(M_{\Sigma\text{диф}})); \quad (8)$$

$$M_{\Sigma\text{диф}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}(f(v)); \quad (9)$$

$$M_{\Sigma\text{вост}} = M_{\Sigma\text{диф}}, \quad (10)$$

де S_{AA} – площа проекції поверхні надводної частини ПМ.

Для рішення цих рівнянь необхідно визначити сили і моменти, які входять до них. Сила Pe може бути визначена за результатами досліджень ПМ або даними у роботі [3].

Моменти від сили Pe відповідно Ox – (M_{Pex}) і Oy – (M_{Pez}) можуть бути визначені з виразів: $M_{ПМx} = Pe l_{Px}$, $M_{ПМz} = Pe l_{Pz}$ (l_{Px} і l_{Pz} – відстані між Pe і центром ваги ПМ).

Маса води, що потрапила на носову частину ПМ (G_B), залежить від швидкості руху ПМ по воді, висоти підпірної хвилі – h_B , конструкції хвилевідбивного щитка і кута нахилу носової поверхні корпусу машини, зануреної у воду – α_B . Величина G_B дорівнює

$$G_B = V_B \rho, \quad (11)$$

де V_B – об'єм (м^3) і ρ – щільність води (кН/м^3), а момент від дії G_B

$$M_{G_B} = G_B l_B, \quad (12)$$

l_B – відстань від ц.в. V_B до центра ваги машини.

Сила R_{Wx} визначається за формулою

$$R_{Wx} = k_{Wx} S_w V_w^2, \quad (13)$$

де k_{Wx} – коефіцієнт обтікання ($k_{Wx} = 0,7 \div 0,75$);

S_w – площа проекції надводної частини ПМ на площу міделя (м^2).

Момент M_{Wx} дорівнює

$$M_{Wx} = R_{Wx} h_{Fx}, \quad (14)$$

де h_{Fx} – відстань між центром ваги і центром впливу R_{Wx} .

Момент $M_{\Sigma\text{вост}}$ визначається за відомою метацентричною формулою

$$M_{\Sigma\text{вост}} = G l_{\psi}, \quad (15)$$

де G – сила ваги ПМ, кН; l_{ψ} – плече статичної остійності, м.

Опір води руху ПМ можна обчислити як

Теорія і проектування судів

$$R_x = R_{кор} + R_{хч} + R_{диф}, \quad (16)$$

де $R_{кор}$, $R_{хч}$, $R_{диф}$, – відповідно опори води корпусу, ходової частини й за рахунок диференту.

Величина $R_{кор}$ визначається по формулі А. С. Карапетова [2]

$$R_{кор} = R_f + R_c = f S v^{1,83} + \varphi S_o v^{2,5}, \quad (17)$$

де R_f , R_c – опір тертя і форми;

$$f = 0,17;$$

S – змочена поверхня корпусу;

$$\varphi = 12 \div 20;$$

S_o – площа поперечного переріза корпусу ПМ нижче ватерлінії.

Величина $R_{хч}$ гусеничної ПМ визначається по формулі Н. В. Ветчинкина [2]

$$R_{хч} = R_{fхч} + R_{Cfхч} = f' S' v^{1,83} + \varphi' S_o' v^{2,5}, \quad (18)$$

де $R_{fхч}$, $R_{Cfхч}$ – опори тертя і форми;

$f' = 0,67$; S' – змочена поверхня елементів ходової частини;

$$\varphi' = 57,1;$$

S_o' – площа поперечного переріза ходової частини ПМ.

Сумарний диферентуючий момент, що діє на ПМ у подовжній площині, знаходиться

$$M_x = M_{x_{кор}} + M_{x_{хч}} + M_{x_{диф}}. \quad (19)$$

Диферентуючий момент $M_{x_{диф}}$ від впливу початкового диференту ПМ можна приблизно знайти, виходячи з допущення, що його величина залежить тільки від зміни площі поперечного переріза корпусу і ходової частини ПМ. Тоді величину додаткової сили опору $R_{x_{диф}}$, яка викликає $M_{x_{диф}}$, можна визначити аналогічно силі R_x

$$R_{x_{диф}} = k_{хч} \rho \Delta F v^2, \quad (20)$$

де $k_{хч}$ – коефіцієнт, що залежить від типу ходової частини ПМ;

ΔF – зміна площі поперечного переріза ПМ, зануреного у воду.

Момент $M_{x_{диф}}$ дорівнює

$$M_{x_{диф}} = R_{x_{диф}} l_{AF}, \quad (21)$$

де $l_{\Delta F}$ – відстань від центра ваги ПМ до центра площі ΔF .

Величини $M_{кор}$ і $M_{хч}$ можна знайти з виразів

$$M_{кор} = R_{Xкор} l_{кор}, \quad (22)$$

$$M_{хч} = R_{Xхч} l_{хч}, \quad (23)$$

де $l_{кор}$ – відстань між центром прикладення сили $R_{Xкор}$ і ЦВ ПМ ($R_{Xкор} = R_X$);
 $l_{хч}$ – відстань від центра прикладення сили $R_{Xхч}$ до ЦТ ПМ ($R_{Xхч} = R_{хч}$).

При русі по воді на ПМ діють гідродинамічні сили, які приводять до зміни посадки машини. Сума гідродинамічних сил дорівнює

$$R_z = R_{Zкор} + R_{Zхч} + R_{Zh/Te} + R_{Zдуф}, \quad (24)$$

де $R_{Zкор}$, $R_{Zхч}$, $R_{Zh/Te}$, $R_{Zдуф}$ – складові сили опору (R_z), відповідно: корпуса, ходової частини, глибини водойма і початкового диференту. Ці сили залежать тільки від розподілу тиску по поверхні зануреної у воду частини ПМ.

Сумарний гідродинамічний момент обчислюємо аналогічно (19)

$$M_z = M_{Zкор} + M_{Zхч} + M_{Zh/Te} + M_{Zдуф}, \quad (25)$$

де $M_{Zкор}$, $M_{Zхч}$, $M_{Zh/Te}$, $M_{Zдуф}$ – моменти сил $R_{Zкор}$, $R_{Zхч}$, $R_{Zh/Te}$, $R_{Zдуф}$.

Вирази для моментів запишуться так:

$$M_{Zкор} = R_{Zкор} l_{Zкор}; \quad (26)$$

$$M_{Zхч} = R_{Zхч} l_{Zхч}; \quad (27)$$

$$M_{Zh/Te} = R_{Zh/Te} l_{Zh/Te}; \quad (28)$$

$$M_{Zдуф} = R_{Zдуф} l_{Zдуф}, \quad (29)$$

де $l_{Zкор}$, $l_{Zхч}$, $l_{Zh/Te}$, $l_{Zдуф}$ – плечі дії сил $R_{Zкор}$, $R_{Zхч}$, $R_{Zh/Te}$, $R_{Zдуф}$.

Як відмічалось у роботах [9-12], в теперішній час необхідність у розробці обґрунтованих методів розрахунку величини R_z , M_z , і їхніх складових ($R_{Zкор}$, $R_{Zхч}$, $R_{Zдуф}$, $M_{Zкор}$, $M_{Zхч}$, $M_{Zh/Te}$, $M_{Zдуф}$) потребує проведення додаткових досліджень, які б дали змогу запропонувати ряд математичних моделей для визначення складових R_z , M_z .

У зв'язку з цим були розроблені математичні моделі (ММ) на основі регресійних залежностей гідродинамічних сил і моментів, які

діють на занурену у воду частину корпусу ПМ. При складанні ММ занурена частина ПМ була умовно розділена на три характерні ділянки взаємодії з водяним потоком: носову, днище і кормову частини корпусу. Для кожної частини були отримані відповідні ММ сумарних гідродинамічних сил і викликаних ними гідродинамічних моментів. Попередній аналіз показав, що в ММ можуть бути використані поліноми четвертого ступеня виду: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \dots + a_{n-2}x_3^4 + a_{n-1}x_4^4 + a_nx_1 x_2 x_3 x_4 \dots$. При розробці кожної ММ, яка описує функцію відгуку, розглядалися конкуруючі ММ, що відрізняються один від другого ступенем обліку факторів впливу. Модель вважалася обраною, коли дотримувалися умови по точності (не менш 99% відповідності з точними значеннями) і мінімально можливою кількістю членів полінома, що забезпечують точність. При проведенні чисельних експериментів було виконано їхнє планування і визначення діапазонів зміни факторів. Коефіцієнти регресії визначалися ітераційним квазіньютонівським методом (критерій збіжності 0,0001) з використанням стандартної програми «Statistica-6».

Загальний вираз для діючих на занурену частину корпусу ПМ гідродинамічних сил та моментів має вигляд

$$F_{\Sigma} = F_N + F_D + F_K, \quad (30)$$

$$M_{\Sigma} = M_N + M_D + M_K, \quad (31)$$

де $F_N, F_D, F_K, M_N, M_D, M_K$ відповідно гідродинамічні сили і моменти, які діють на ніс, днище і корму ПМ.

Для одержання ММ гідродинамічної сили F_N і моменту M_N , що діють на носову частину ПМ, приймалися в якості значимих такі фактори: швидкість руху ПМ (v_{nm}); площа зануреної у воду носової частини (S_n); кути нахилу носової частини (α_n), і днища (β_δ). Діапазон зміни факторів приведений у табл. 1. Функції відгуку мають вид $F_N = f(v_{nm}; S_n; \alpha_n, \beta_\delta)$ і $M_N = f(v_{nm}; S_n; \alpha_n, \beta_\delta)$.

Таблиця 1

Діапазон зміни значень факторів впливу

| Фактори впливу код значення | v_{nm} (м/с) (Re) | S_n (м ²) крок (1,925 м ²) | α_n (°)/(крок 6°) | β_δ (°)/(крок 6°) |
|--------------------------------|---------------------|--|--------------------------|------------------------------|
| -1 | 0 (0) | 1,4 | 34 | +6 на ніс |
| 0 | 1,666668 (1,1E-05) | 3,85 | 40 | 0 |
| 1 | 3,333336 (2,77E-05) | 5,25 | 46 | -6 на ніс |

Коефіцієнти ММ приведені в табл. 2.

При визначенні ММ гідродинамічної сили F_D і моменту M_D , діючих на днище ПМ, приймалися наступні фактори: швидкість руху ПМ v_{nm} ; довжина днища ПМ ($L_{ПМ}$); кути його нахилу α_n і β_δ . Функції відгуку мають вид $F_D = f(v_{nm}; L_{ПМ}; \alpha_n, \beta_\delta)$ і $M_D = f(v_{nm}; L_{ПМ}; \alpha_n, \beta_\delta)$.

Теорія і проектування судів

Таблиця 2

*Коефіцієнти ММ $F_H = f(v_{пм}; S_n; \alpha_n, \beta_\delta)$
(з урахуванням взаємодії факторів 1-го і 2-го порядку)*

| | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--|--|-----------------------------------|
| Const.C | Const.a ₀ | при X ₁ | при X ₂ | при X ₃ | при X ₄ | при X ₁ X ₂ | при X ₁ X ₃ |
| -1,66772 | 1,152035 | 0,649946 | -0,1102 | 0,029341 | 0,166731 | -0,10108 | 0,019952 |
| при X ₂ X ₃ | при X ₁ X ₄ | при X ₂ X ₄ | при X ₃ X ₄ | X ₁ X ₂ X ₃ | X ₁ X ₂ X ₄ | X ₂ X ₃ X ₄ | |
| 0,025071 | 0,15476 | -0,0236 | -0,00221 | 0,01577 | -0,03725 | -0,01964 | |
| Коефіцієнти регресії ММ $M_H = f(v_{пм}; S_n; \alpha_n, \beta_\delta)$ (з урахуванням взаємодії 1-го і 2-го порядку) | | | | | | | |
| Const.C | Const.a ₀ | при X ₁ | при X ₂ | при X ₃ | при X ₄ | при X ₁ X ₂ | при X ₁ X ₃ |
| -0,13371 | -0,63948 | 1,375274 | -0,01283 | 0,013952 | 0,110328 | -0,0112 | 0,010539 |
| при X ₂ X ₃ | при X ₁ X ₄ | при X ₂ X ₄ | при X ₃ X ₄ | X ₁ X ₂ X ₃ | X ₁ X ₂ X ₄ | X ₂ X ₃ X ₄ | |
| 0,023555 | 0,100159 | 0,00262 | 0,016197 | 0,020706 | -0,01166 | -0,02974 | |

Значення факторів приведені у табл. 3 та коефіцієнти ММ – у табл.4.

Таблиця 3

*Значення факторів, які впливають на гідродинамічну силу F_d
і момент M_d*

| Фактори впливу | $v_{пм}$ (м/с) (Re) | $L_{пм}$ (м) | α_n (°) / (крок б°) | β_δ (°) / (крок б°) |
|----------------|---------------------|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| код значення | | | | |
| -1 | 0 (0) | 5,6 | 34 | +6 на ніс |
| 0 | 1,666668 (1,1E-05) | 8,65 | 40 | 0 |
| 1 | 3,333336 (2,77E-05) | 10,87 | 46 | -6 на ніс |

Таблиця 4

*Коефіцієнти ММ $F_d = f(v_{пм}; L_{пм}; \alpha_n, \beta_\delta)$
(з урахуванням взаємодії факторів 1-го і 2-го порядку)*

| | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Const.a ₀ | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | A ₅ | a ₆ | a ₇ |
| -13,6 | -26,9731 | 1,553128 | 1,366864 | 4,096874 | -3,34328 | -3,34328 | -3,34328 |
| a ₈ | a ₉ | a ₁₀ | a ₁₁ | a ₁₂ | A ₁₃ | a ₁₄ | a ₁₅ |
| -3,34328 | 1,553124 | 1,366879 | 0,450615 | -0,00062 | 4,096883 | 1,355636 | 0,450615 |
| a ₁₆ | a ₁₇ | a ₁₈ | | | | | |
| 0,000622 | -0,00064 | 0,000622 | | | | | |

Коефіцієнти регресії ММ $M_d = f(v_{пм}; L_{пм}; \alpha_n, \beta_\delta)$ (з урахуванням факторів 1-го і 2-го порядку)

| | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Const.a ₀ | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | A ₅ | a ₆ | a ₇ |
| -19,1496 | -37,1081 | -8,01811 | 5,306876 | 15,92061 | -8,01813 | 5,306876 | 15,92061 |
| a ₈ | a ₉ | a ₁₀ | a ₁₁ | a ₁₂ | A ₁₃ | a ₁₄ | a ₁₅ |
| 2,849374 | 8,548112 | 0,000621 | 1,42468 | 4,274034 | 0,000316 | 0,000312 | 0,000314 |
| a ₁₆ | a ₁₇ | a ₁₈ | a ₁₉ | | | | |
| -2,24482 | -2,24482 | -2,24482 | -2,24482 | | | | |

Для одержання ММ гідродинамічної сили F_k і гідродинамічного моменту M_d , які діють на корму ПМ, приймалися в якості значимих факторів: $v_{пм}$; осідання ПМ (Тк); кути α_n і β_δ . Функції відгуку – $F_k = f(v_{пм}; T_k; \alpha_n, \beta_\delta)$, і $M_k = f(v_{пм}; T_k; \alpha_n, \beta_\delta)$. Значення факторів приведені у табл. 5 та коефіцієнти ММ – у табл. 6.

Теорія і проектування судов

Таблиця 5

Значення факторів,
що впливають на гідродинамічну силу F_k і момент M_k

| Фактори впливу | $v_{nm}(m/c)$ (Re) | T_k (м) | α_d (°) | β_d (°) |
|----------------|---------------------|-----------|----------------|---------------|
| Код значення | | | | |
| -1 | 0 (0) | 0,75 | 34 | +6 на ніс |
| 0 | 1,666668 (1,1E-05) | 1,1533 | 40 | 0 |
| 1 | 3,333336 (2,77E-05) | 1,45 | 46 | -6 на ніс |

Для аналізу запропонованого методу була проведена порівняльна його оцінка з даними модельних досліджень ПМ, виконаних в опитовому басейні ОНМУ на моделі ПМ в масштабі 1:7 ($D=19 \text{ м}^3$; $L=7,29 \text{ м}$). Результати випробовувань представлені графіками залежностей зміни ходового диференту ПМ (рис. 2) і буксировочного опору (рис. 3) від швидкості руху. Порівняльний аналіз результатів досліджень і розрахункових даних дає високу збіжність.

Таблиця 6

*Коефіцієнти регресії ММ $F_k = f(v_{nm}; T_k; \alpha_n, \beta_d)$
(з обліком взаємодії факторів 1-го і 2-го порядку)*

| Const.a ₀ | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | A ₅ | a ₆ | a ₇ |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| -0,11992 | -0,48735 | 0,112512 | 0,018783 | 0,056275 | 0,112512 | 0,018783 | 0,056275 |
| a ₈ | a ₉ | a ₁₀ | a ₁₁ | a ₁₂ | A ₁₃ | a ₁₄ | a ₁₅ |
| 0,006286 | 0,018784 | 3,77E-05 | 0,003075 | 0,00935 | -5,3E-05 | -4,8E-05 | -4,6E-05 |
| a ₁₆ | a ₁₇ | a ₁₈ | a ₁₉ | | | | |
| -0,04596 | -0,04596 | -0,04596 | -0,04596 | | | | |

*Коефіцієнти регресії ММ $M_k = f(v_{nm}; T_k; \alpha_n, \beta_d)$
(з урахуванням взаємодії факторів 1-го і 2-го порядку)*

| Const.a ₀ | a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | A ₅ | a ₆ | a ₇ |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0,0065 | 0,010151 | -0,00613 | -0,0005 | -0,00169 | -0,00613 | -0,0005 | -0,0017 |
| a ₈ | a ₉ | a ₁₀ | a ₁₁ | a ₁₂ | A ₁₃ | a ₁₄ | a ₁₅ |
| 0,000439 | 0,00112 | 9,07E-05 | 0,000222 | 0,000532 | 5,82E-05 | 5,42E-05 | 5,75E-05 |
| a ₁₆ | a ₁₇ | a ₁₈ | a ₁₉ | | | | |
| 0,000455 | 0,000455 | 0,000455 | 0,000455 | | | | |

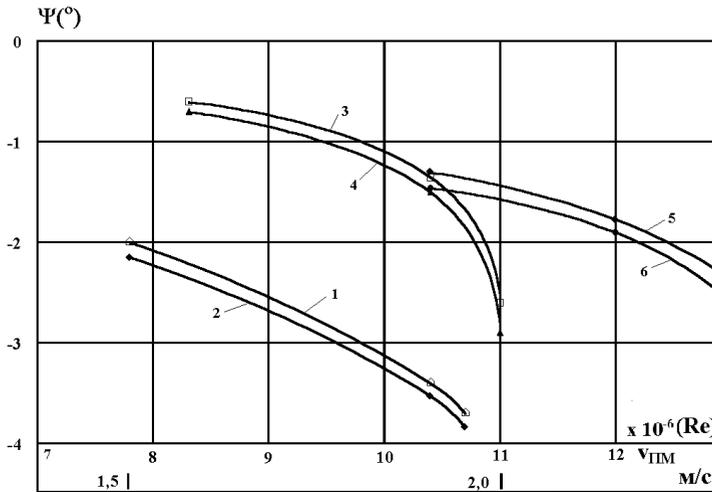


Рис. 2. Залежності зміни ходового диферента ЛБМ від швидкості руху:

- 1 і 2 – іспит і розрахунок без диференту;
- 3 і 4 – іспит і розрахунок при диференті 1° на корму;
- 5 і 6 – іспит і розрахунок без диференту

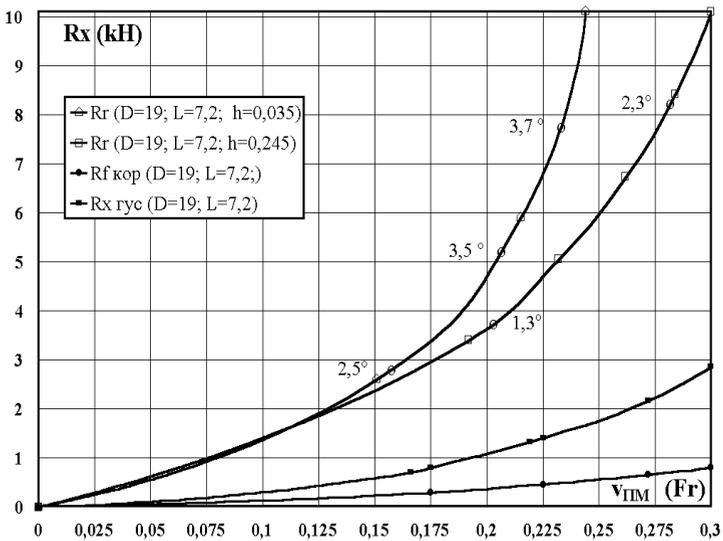


Рис. 3. Змінення опори води руху ЛБМ від швидкості руху і кута диферента:

- R_r - сумарний опір;
- $R_{f_{кор}}$ - опір тертя;
- $R_{x_{гус}}$ - опір гусениць;
- ° точки виміру кута диференту машини

Натурні дослідження [10] підтвердили можливість застосування розробленого методу для розрахунків ходкості ПМ. Проведені дослідження [12] дали можливість запропонувати обґрунтовану класифікацію конструктивних рішень, що компенсують чи знижують вплив диферентуючого моменту на водохідні властивості ПМ (рис. 4).

За критерій оцінки показника якості конструкції ПМ запропоновано приймати відносний коефіцієнт опору води руху ПМ ($K_{Rx(v)}$), який являє собою відношення сили опору води для розрахункової швидкості руху машини ($Rx_{a(v)}$) при наявності диференту до сили опору води для розрахункової швидкості руху машини без ходового диференту ($Rx_{0(v)}$)

$$K_{Rx(v)} = (Rx_{a(v)}) / (Rx_{0(v)}).$$

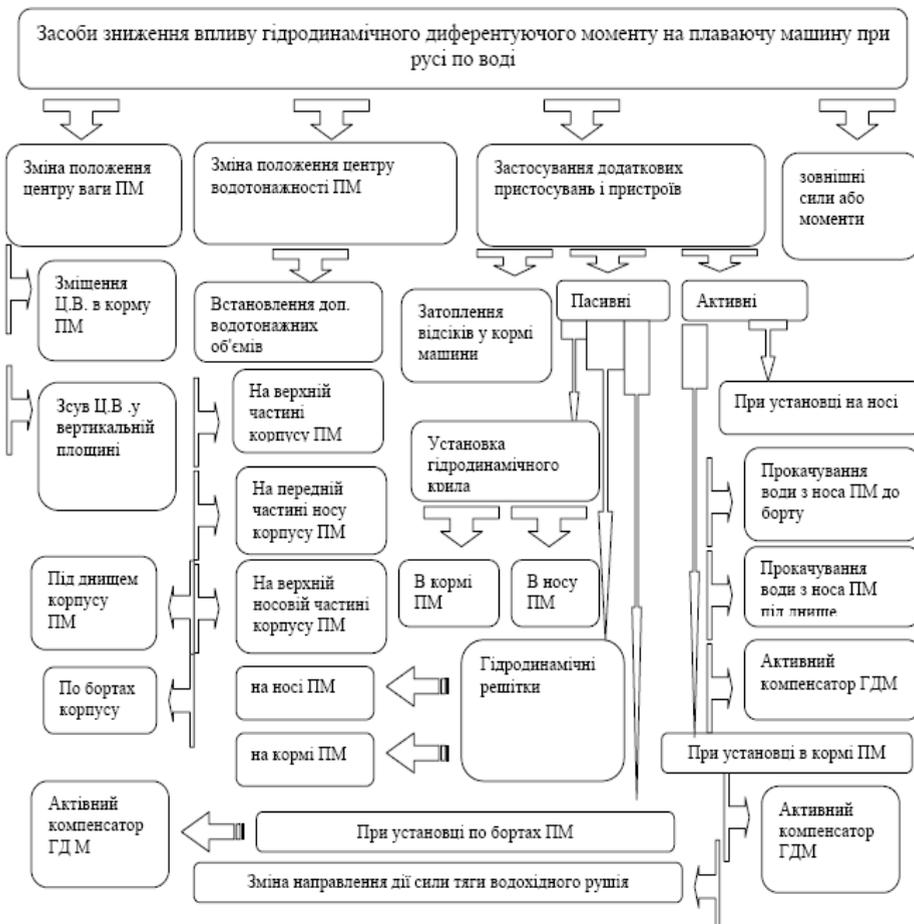


Рис. 4. Конструктивні схеми пристроїв, які компенсують вплив диферентуючого гідродинамічного моменту на ходкість плаваючої машини

Висновки

1. Розроблений метод розрахунку ходового диференту, буксирного опору та інших водохідних характеристик ПМ.
2. Виведені математичні моделі для визначення сил і моментів, що діють на корпус машини, з урахуванням геометричних розмірів та конструктивних особливостей машини і швидкості її руху по воді.
3. Виконана порівняльна оцінка результатів розрахунку за запропонованим методом з даними досліджень, які показала досить близьку збіжність.
4. Розроблена класифікація конструктивних рішень для усунення або зниження впливу гідродинамічного диферентуючого моменту на водохідні якості ПМ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Степанов А.П. *Методика расчета основных водоходных качеств плавающих машин.* М.: ВА БТВ – 1971. – 41 с.
2. Аксенов П.В., Кононович Ю.А. *Плавающие колесные и гусеничные машины.* М.: Воениздат, 1973. – С. 73-89.
3. Степанов А.П. *Конструкция и расчет плавающих машин.* М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
4. Вознюк В.С. *Гидравлика и гидравлические машины.* М.: Воениздат, 1979. – С. 59-61.
5. Воробьев Ю.Л., Бугаев С.В. *Экспериментальные исследования сопротивления воды движению модели гусеничной машины высокой проходимости.* Л.: Судостроение, НТО им. Крылова, 1984. – Вып. 390. – С.51-54.
6. Бородин Н. Г. *Машины инженерного вооружения. Ч. 2.* М.: Воен. издат., 1986. – 469 с.
7. Степанов А.П. Давыдов Н. Г. *Эксплуатация и безопасность движения плавающих машин.* М.: Транспорт, 1988. – 316 с.
8. Шишкин В.А. *Водоходные свойства колесных машин.* М.: ВА БТВ, 1991. – 51 с.
9. Бугаев С.В. *Плавающая машина. Теория и эксперимент: Монография.* – Одеса: ОГМУ, 2000. – 253 с.
10. Бугаев С.В. *Гидродинамика плавающей машины: Монография.* – Одесса: Печатный дом, 2007. – 295 с.
11. Бугаев С.В. *Деякі питання взаємодії плаваючої машини з водяним середовищем // Вісник ЦНЦ ТАУ.* – 1999. – № 2. – С. 101-103.
12. Бугаев С.В. *Аэродинамические исследования распределения давления по контуру погруженной части плавающей машины // Вісник ОДМУ.* – 1999. – № 4. – С. 127-132.

13. Бугаев С.В. *Определение гидродинамической силы, действующей на днище плавающей машины // Вісник ОДАБА. – 2007. – № 25. – С. 55-68.*
14. Бугаев С.В. *Оценка величины гидродинамического момента, действующего на днище плавающей машины при движении по воде // Вісник ОДАБА. – 2007. – № 26. – С. 58-71.*

Надійшла 22.05.08

ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ МАЛОТОННАЖНЫХ И СРЕДНЕТОННАЖНЫХ СУХОГРУЗНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СУДОВЛАДЕЛЬЦЕВ

Изложены основы выбора главных характеристик малотоннажных и среднетоннажных многоцелевых сухогрузных судов для отечественных судовладельцев. Показано, что эти суда должны объединять в себе черты универсального сухогруза, балкера, лесовоза и фидерного контейнеровоза, причем приоритетом является приспособленность к перевозкам массовых грузов. При этом судам рекомендуется осадка 7,5-8,0 м, ледовые подкрепления ЛУ2 – ЛУ4, эксплуатационная скорость, оптимальная для переходов порты СНГ – Китай.

Ключевые слова: проектирование, малотоннажные и среднетоннажные сухогрузные суда, главные размерения, путевые условия.

Существующий сухогрузный флот, подконтрольный отечественным судовладельцам, в большинстве своем состоит из судов смешанного река-море плавания (ССП) грузоподъемностью от 2 до 5 тысяч тонн типа «Волго-Балт», «Сормовский», «Волго-Дон», «Волжский», «Амур», «СТК», «СТ», «Балтийский», «Омский», «Волга» и других [1].

Это обстоятельство является результатом взаимодействия нескольких факторов, а именно массового «исчезновения» морских сухогрузных судов вместе с Черноморским, Балтийским, Грузинским пароходствами, уходом флота прибалтийских пароходств, децентрализации внешнеэкономической деятельности с дроблением партий грузов, выходом на арену частных судовладельцев и речных пароходств.

«Лицо» флота стремительно изменилось в течение последнего десятилетия прошлого столетия.

Следует отметить, что «уходу» морских сухогрузных судов способствовали не только криминальные, но и вполне объективные причины, связанные с техническими характеристиками этих, как правило, универсальных твиндечных сухогрузов, уже тогда морально устаревших и не приспособленных к современным методам грузообработки

Суда смешанного река-море плавания, благодаря своим весьма эффективным «ящичным» трюмам, востребованной грузоподъемности, отвечающей принятой партионности грузов и малой осадке, а также малой остаточной стоимости, появились в подходящее время и в подходящем месте.

Однако факт наличия значительных ограничений у большинства существующих судов такого типа помимо преимуществ в связи со снижением металлоемкости корпуса и мощности главных двигателей [1], имеет и обратную сторону в виде потерь ходового времени в ожидании благоприятного прогноза и существенного снижения скорости хода на волнении.

Безусловно, при проектном подходе к эксплуатации ССП, который подразумевает в весенне-летний сезон их работу с речных (или устьевых) портов на морские порты и только в осеннее-зимний период эксплуатации только в морских районах с учетом назначенных классом ограничений, не должно возникать вопросов к обеспечению надежности и безопасности ССП.

Но значительная часть ССП стала работать исключительно в морских районах, вообще без захода в пресную воду.

После 5-7 лет эксплуатации в подобных условиях реальную опасность теперь представляют усталостные повреждения наиболее нагруженных узлов верхних связей (продольных комингсов, палубы, ширстрека) и водотечность наружной обшивки, обшивки второго борта, настила второго дна.

Основной причиной большинства типовых повреждений корпусов ССП являются технологические и конструктивные дефекты, возникшие на этапах проектирования, строительства и модернизации судов и усугубленные эксплуатацией с нарушениями установленных ограничений (часто сознательных).

Как уже неоднократно отмечалось, сам класс ССП возник и развивается по чисто экономическим причинам, соответственно, большинство упомянутых выше проблем имеют ту же природу (в сочетании с обычными ошибками).

Необходимо иметь в виду, что опасность «субъективного» фактора для таких судов с ограниченной надежностью корпусов существенно выше, чем для морских, а команды в силу меньшего уровня оплаты труда менее компетентны и дисциплинированы.

Отсюда следует общий вывод о том, что при сохранении существующего подхода к эксплуатации корпусов ССП длительность их безопасной эксплуатации в море не превысит 10-12 лет. С учетом того факта, что большинство из них вышло в море в начале 90-х годов, в ближайшее время можно ожидать существенного увеличения числа аварий корпусов ССП в морских районах.

Для морской эксплуатации необходимо строить морские сухогрузные суда, отличные от ССП, с более высоким стандартом прочности корпуса, более мощными двигателями, более мореходными обводами, меньшим коэффициентом общей полноты и «морскими» соотношениями главных размеров.

Такой вывод совершенно не означает, что следует вообще отказаться от отечественного флота ССП, численность которого превышает

1500 единиц. Просто предлагается реализовывать рациональный подход, при котором ССП будут применяться в рамках своего назначения, а морские малотоннажные и среднетоннажные сухогрузы – для своего, так как эксплуатировать суда ограниченных районов плавания (с классами ПСП и ниже) де-факто без выполнения этих ограничений опасно, причем, чем старше эти суда и чем меньше у них запасы прочности, тем выше становится риск такой «неограниченной» морской эксплуатации ССП.

Целью статьи является обоснование главных характеристик многоцелевых морских сухогрузных судов дедвейтом около 10 тыс. т и менее, востребованных отечественными судовладельцами.

В мировом торговом флоте на 01.01.2005 среди 12691 универсальных сухогрузов (средний возраст 22,6 года) 8635 (68%) имели дедвейт до 5000 тонн, 2278 (18%) – от 5000 до 10000 т, 1145 (9%) – от 10000 до 20000 т. За 2004 год были сданы на металл 191 судов дедвейтом до 10000 т, построено 152 единицы, причем опережение списания над поступлением новых судов этого типа устойчиво наблюдается с начала 90-х годов [3; 4]. Согласно табл. 1, составленной по данным [6], на начало 2003 года из 4575 европейских многоцелевых сухогрузов дедвейтом до 10000 т 58% были старше 20 лет, а 42% – старше 25 лет.

Таблица 1

*Распределение по типам и возрастам европейских транспортных судов
(по состоянию на начало 2003 года)*

| Тип судна | Старше 20 лет | Старше 25 лет | Старше 30 лет | Старше 35 лет | Всего |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|
| Сухогрузы | 2640 | 1916 | 1067 | 478 | 4575 |
| Рефрижераторы | 293 | 117 | 39 | 17 | 534 |
| Накатные | 254 | 170 | 69 | 25 | 359 |
| Балкеры | 145 | 110 | 33 | 14 | 194 |
| Контейнеровозы | 69 | 41 | 18 | 2 | 339 |
| Цементовозы | 80 | 68 | 46 | 18 | 86 |
| Суда всех типов | 5475 | 3825 | 2110 | 985 | 10019 |

Средний возраст, при котором списывали сухогрузы в 2005 году – 30,6 года. До 2010 года ожидается списание около 4700 судов, причем в основном твиндечных.

Около 76% заказанного новостроя – суда дедвейтом до 10 тыс. тонн, которые активно списываются (80%).

Очевидно, что в подобной ситуации строительство морских сухогрузов для отечественных судовладельцев будет экономически оправданным при условии, что их главные характеристики будут отвечать реальной грузовой базе и путевым условиям. Особенно интересны многоцелевые сухогрузные суда, имеющие относительно небольшие осадки,

что позволяет им работать на порты с ограниченным путевыми условиями, куда не смогут заходить их главные конкуренты – специализированные контейнеровозы и балкеры. Например, в 2006 году балкеров с осадкой 8,0 м и менее было всего 937 единиц (14,4%). До 1991 года при обосновании программ пополнения флота ЦНИИ Морского Флота разрабатывались параметрические ряды судов-претендентов, которые содержали основные технико-эксплуатационные характеристики перспективных транспортных судов [5]. Такие исследования проводились на базе анализа судов-прототипов, с учетом сложившейся практики перевозок тех или иных грузов, особенностей грузопотоков, проходных глубин в портах исследуемых линий, указаний директивных органов власти, направлений совершенствования аналогичных объектов в зарубежном судостроении и мировой торговле [2].

В настоящее время подобные централизованные исследования не проводятся, что вынуждает проектные организации и судовладельцев определять главные характеристики судов, исходя из собственных, порой достаточно субъективных, взглядов и ограниченных финансовых возможностей, часто получая при этом недостаточно убедительные решения.

Анализ путевых условий, важных для отечественных судовладельцев, показывает, что проход через Керчь-Еникальский канал в светлое время допускается для судов с осадкой до 8,0 м, что Финским заливом до СПб зимой рекомендуется пропускать суда с осадкой не более 8 м (в тяжелых ледовых условиях при ледовой проводке ледоколами), рекомендованные осадки для порта Керчь – 8,3 м, Мариуполя – 8,0 м (для причалов 2-6, 9, 10, 16-18, где глубины 8,5 м и более), причем суда с осадками 7,5 м и более считаются находящимися в стесненных условиях для судовождения в канале и у причалов 11-15, где глубины 8-8,25 м). В районе Новороссийска глубина составляет – 7,5-11,0 м; Калининграда – 9,0 м; Санкт-Петербурга – 7,2-11,4 м (есть, конечно, и меньше); Туапсе – 9,2-12,0 м. Поэтому для судов нового поколения рекомендуется осадка 7,5-8,0 м.

Анализ ледовой обстановки позволяет сделать вывод, что зимой для работы в Азовском море требуется класс не менее ЛУ1, на Санкт-Петербург, а также Прибалтику – ЛУ2 (иногда ЛУ3), Ботнику – ЛУ3 (иногда ЛУ4), Белое море (Архангельск) – ЛУ4. Можно рекомендовать класс ЛУ2-ЛУ4 (аналог 1С-1А в финско-шведских правилах).

В целом, морские сухогрузы нового поколения для российских заказчиков, по мнению автора, должны:

- соответствовать отечественным портам с относительно небольшими проходными глубинами;
- иметь ледовые подкрепления, достаточные для работы в Балтийском море;
- перевозить прокат черных и цветных металлов, слябы, штрипсы, чугуны, зерновые грузы, бревна и пиломатериалы, калийные и минеральные удобрения, уголь, бумагу, кокс, металлолом, серу, руды и рудные

концентраты, широкую номенклатуру других опасных грузов, как насыпью, так и в упаковке;

- обеспечивать перевозку контейнеров, в том числе 40-футовых контейнеров, высотой до 9,5 футов;
- иметь эксплуатационную скорость, оптимальную для переходов порты СНГ – Китай (при дедейте более 10000 т);
- объединять в себе черты универсального сухогруза, балкера, лесовоза и фидерного контейнеровоза, причем приоритетом является приспособленность к перевозкам массовых грузов.

В табл. 2 представлена классификация морских сухогрузных судов нового поколения, которые были построены, модернизированы, либо предлагаются к строительству по проектам Морского Инженерного Бюро в период с 2003 года по настоящее время. В состав данной сетки проектов входят наиболее востребованные на современном рынке транспортных услуг России следующие основные классы сухогрузных судов:

- класс европейских «коастеров» с конвенционной длиной до 85 м, позволяющей не устанавливать спасательные шлюпки, с одним «ящичным» трюмом, хорошо приспособленным для проектных грузов. Суда проектов 003RSD04 и RSD16 могут работать на внутренних водных путях РФ;
- класс европейских «коастеров» с габаритную длиной до 100 м, позволяющей работать в европейских портах, не пользуясь услугами лоцманов;
- класс европейских «коастеров» – устьевых сухогрузов грузоподъемностью 5000-6000 т при осадке 5,5 м, ориентированный на работу с дунайских (Измаил, Рени) и днепровских (Николаев, Херсон) портов;
- класс азовско-каспийских «коастеров», которые приспособлены для работы при осадках 4,20-4,50 м с возможностью прохода (для передислокации) по ВДСК (или без него, как, например, проект RSD12);
- класс морских сухогрузов с дедейтем от 6 до 10 тыс. тонн, большинство из которых имеет осадку до 7,0-8,0 м.

Схемы боковых видов предлагаемого ряда сухогрузных судов МИБ, в том числе модернизированные суда, построенные в Китае (DCV25, DCV26, DCV27 и DCV37), приведены в едином масштабе в табл. 3.

Семь проектов имеют неограниченный район плавания, шесть соответствуют требованиям I ограниченного района плавания, три – II района. Конструкция корпусов пяти проектов соответствуют ледовой категории РС ЛУ2 (в старой классификации ЛЗ), двух – ЛУ4 (ранее Л1), двух – ЛУ3 (ранее Л2), четырех – ЛУ1 (ранее Л4). Три судна китайской постройки ледовой категории не имеют, что характерно для судов, строящихся на верфях Китая. Осадки по ЛГВЛ на всех проектах, за исключением быстроходного сухогруза пр. DCV16, меньше 8,0 м.

Таблица 2
Основные типоразмеры морских сухогрузных судов, спроектированных Морским Инженерным Бюро

| Отличительная особенность класса судна, номер проекта Морского Инженерного Бюро | Вид сборки (см. табл. 3) | Габаритные длина × ширина × высота борта, м | Дедвейт при максимальной осадке, т | Емкость трюмов, м ³ | Класс Регистра | Верфь |
|---|--------------------------|---|------------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|
| Морские суда дедвейтной группы 6 – 12 тыс. Тонн | | | | | | |
| DCV16 | 5 | 136,72×15,85×12,15 | 8470 (9,20 м) | 10597 | KM(+) | Херсонский СЗ |
| Морские суда дедвейтной группы 6 – 12 тыс. тонн с осадкой до 7,0 – 8,0 м | | | | | | |
| DCV22 | 1 | 156,10×19,30×8,80 | 9382 (7,00 м) | 14180 | KM (★) Л1 А2 | Молеризация на верфи в Катге |
| DCV45L | 2 | 150,95×17,50×10,90 | 12420 (7,94 м) | 15100 | KM (★) Ice3 AUT1 OMIBO ECO PROJECT | «Красное Соромово» (переговоры) |
| DCV25 | 6 | 134,00×19,00×9,20 | 10315 (6,79 м) | 13924 | KM # ЛУ11 | Верфь в Катге |
| DCV37 | 7 | 138,00×18,00×9,70 | 10300 (7,59 м) | 12724 | KM # | Верфь в Катге |
| DCV15 | 9 | 130,60×17,60×7,80 | 6398 (6,75 м) | 8033 | KM (★) Л1 А1 лесовоз | |
| «Азовские» и «Каспийские» суда | | | | | | |
| RSD12 | 3 | 142,00×18,20×6,00 | 8023 (4,767 м) | 10929 | KM (★) ЛУ1 П А1 | Геллиболу (Турция) |
| RSD19 | 4 | 139,95×16,70×6,00 | 7004 (4,60 м) | 10956 | KM (★) ЛУ2 П А1 | Болгогразкий СЗ |
| RSD17 | 8 | 121,70×16,70×6,20 | 6354 (5,06 м) | 9468 | KM (★) ЛУ2 I A1 ECO | «Красное Соромово» |
| Суда для работы в устьевых портах Дуная и Днестра | | | | | | |
| DCV26 | 10 | 115,10×17,20×7,45 | 6826 (5,68 м) | 9057 | KM # ЛУ2 I | Верфь в Катге |
| RSD09 | 11 | 109,12×16,70×6,50 | 6208 (5,50 м) | 8251 | KM (★) ЛУ1 I A1 | Каспийский СЗ |
| Контейнеры с габаритной длиной до 100 м | | | | | | |
| DCV27 | 13 | 99,80×15,80×7,10 | 5070 (5,52 м) | 6673 | KM # ЛУ2 I | Верфь в Катге |
| Контейнеры с расчетной длиной до 85 м | | | | | | |
| DCV33 | 13 | 89,99×14,00×7,15 | 4570 (5,82 м) | 5611 | № 100 A5 E2 DBC G General Cargo Ship, Equipped for Carriage of Containers # MC E2 AUT | Олежский СЗ |
| 003RSD04 | 14 | 89,73×15,80×5,75 | 3756 (4,461 м) | 4832 | KM (★) ЛУ2 П А3 | Туапс, Геллиболу (Турция) |
| RSD16 | 15 | 89,73×13,50×6,10 | 3152 (4,50 м) | 4300 | KM (★) ЛУ1 П А3 (ОВНМ) | |

В семи сериях суда имеют по четыре грузовых трюма, в четырех – по три, в одном – пять (проект DCV22, модернизация судна типа «Павлин Виноградов»), в двух – один трюм со съемными «зерновыми» переборками.

Двенадцать судов имеют одновальную пропульсивную установку, два (проекты RSD12, RSD19) – двухвальную, причем на «азов максе» проекта RSD12 применены полно-поворотные винто-рулевые колонки. Восемь – винты регулируемого шага, в том числе в составе ВПК, совместно с валогенераторами, остальные – винты фиксированного шага. Винты в насадках использованы только на проекте RSD12.

Главные двигатели десяти проектов могут работать на тяжелом топливе IFO 180-380, суда китайской постройки и китайской комплектации – нет. Все главные двигатели, примененные на новых проектах МИБ, относятся к среднеоборотным дизелям, кроме трех. Эксплуатационная скорость для состояния в полном грузу при 85-90% использовании МДМ составляет 11,0-14,0 узлов, исключение составляет проект DCV16, имеющий скорость 20 узлов. Десять проектов имеют класс автоматизации. Экипаж составляет 9-19 человек (меньший состав – для судов менее 5000 тонн, больший – для среднетоннажных сухогрузов).

Грузовые краны, за исключением проектов DCV22 и DCV15, являющихся модернизациями существующих сухогрузов типа «Павлин Виноградов» и «Капитан Лусь», на остальных судах не установлены.

Для всех проектов выполнены требования МК СОЛАС к вероятностному индексу деления на отсеки, на двух проектах – дополнительно требования РС к одноотсечной непотопляемости.

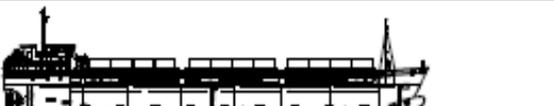
В связи с увеличением объемов перевозок морским транспортом и, соответственно, усилением антропогенного воздействия на окружающую среду, ряд классификационных обществ разработал дополнительные требования, направленные на повышение стандартов экологической безопасности и охраны окружающей среды. Судам, соответствующим новым требованиям, могут быть присвоены дополнительные знаки в символе класса.

Суда с подобными знаками в символе класса более безопасны по отношению к окружающей среде и пользуются большим доверием со стороны грузовладельцев, страховщиков, Морских администраций государств флага, портовых властей. Присвоение дополнительного экологического символа в классе основывается на выполнении требований Международной морской организации, морских администраций и международной морской индустрии к экологической безопасности судов.

При этом отдельные положения дополнительных «экологических» требований классификационных обществ более строгие, чем требования действующих международных документов.

Как правило, дополнительные классы экологической безопасности присваиваются судам, предназначенным для перевозки опасных грузов.

Схемы общих боковых видов морских сухогрузных судов МИБ

| Номер | Проект, максимальный дедвейт | Вид сбоку |
|-------|------------------------------|--|
| 1 | DCV22, 9382 т |  |
| 2 | DCV45L, 12400 т |  |
| 3 | RSD12, 8023 т |  |
| 4 | RSD19, 7004 т |  |
| 5 | DCV16, 8470 т |  |
| 6 | DCV25, 10315 т |  |
| 7 | DCV37, 10300 т |  |
| 8 | RSD17, 6354 т |  |
| 9 | DCV15, 6398 т |  |

| | | |
|----|------------------|---|
| 10 | DCV26, 6826 т |  |
| 11 | RSD09, 6208 т |  |
| 12 | DCV27, 5070 т |  |
| 13 | DCV33, 4570 т |  |
| 14 | 003RSD04, 3756 т |  |
| 15 | RSD16, 3152 т |  |

В первую очередь, дополнительные классы востребованы теми судовладельцами, которые предлагают свои суда ведущим международным фрахтователям.

Требования к знаку «ЭКО» были введены РС в 2006 году и применяются по желанию судовладельца.

Наличие такого знака в символе класса свидетельствуют о том, что судно и его отдельные части с точки зрения защиты окружающей среды имеют более высокий стандарт безопасности, чем суда, отвечающие только требованиям Международной Конвенции МАРПОЛ73/78, и тем самым обеспечивают существенно меньший уровень экологического риска.

Принятые на судах проекта RSD17 дополнительные технические и организационно-технические меры (рис. 1) по предотвращению загрязнения атмосферы выбросами из главного двигателя, котлов, из систем, содержащих вредные газы; предотвращению загрязнения морской среды остатками груза, льяльными и сточными водами, мусором и различного вида техническими маслами; предотвращению переноса вредных патогенных организмов вместе с балластными водами, позволили присвоить судам серии знак классификации «ЭКО».

Повышение общего уровня безопасности и снижение риска перевозки грузов обеспечивается на проекте RSD17 также резервированием движения за счет использования валогенератора в качестве гребного

электродвигателя для привода гребного винта и наличием двойного корпуса, в том числе в местах расположения основных запасов топлива.

Еще более высокий класс – «ЭКО ПРОЕКТ» – заложен в другом проекте для группы компаний «Палмали» – DCV45L дедвейтом 12400 тонн.

В отличие от изложенной в [1] достаточно полной классификации современных ССП, настоящая статья не содержит завершенной для отечественных судовладельцев «линейки» морских сухогрузных судов и предполагает дальнейшее развитие, как предлагаемых проектов, так и новых.

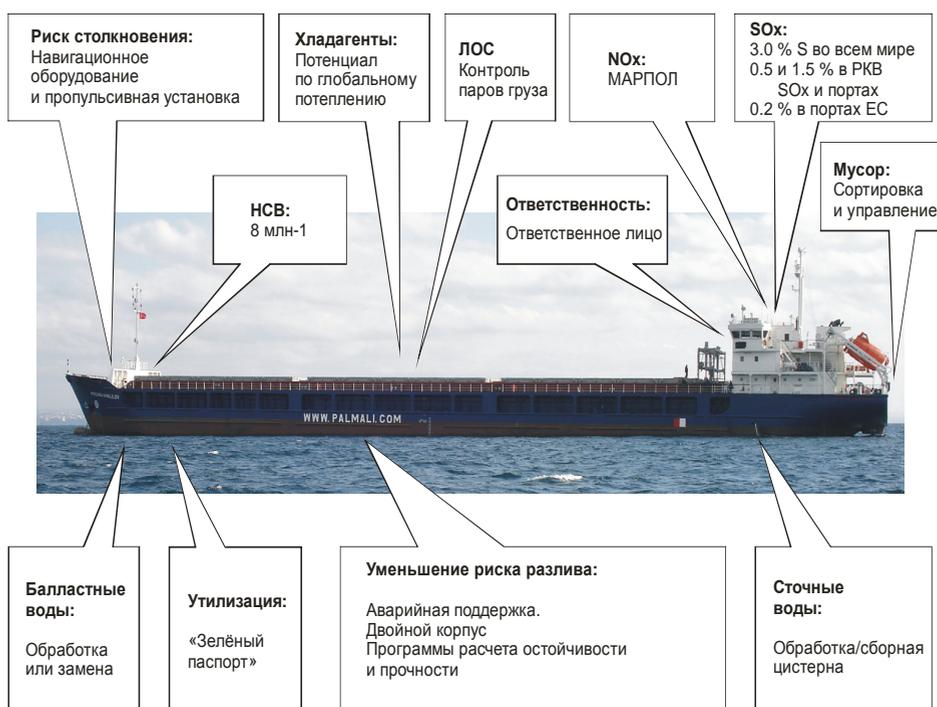


Рис. 1. Основное содержание требований класса ЭКО

Помимо влияния путевых условий и грузовой базы, принципиально важную роль в определении главных элементов морских многоцелевых сухогрузов будут играть выбор верфи – строителя и продолжающийся рост стоимости топлива.

В частности, приведенный в статье проект DCV45L, являющийся некоторым образом попыткой продолжить концепт «Либерти» в современных условиях, имеет достаточно высокое соотношение L/B, сильно отличающееся от принятых в настоящее время соотношения для т.н. «полнокоротких» судов и близкое скорее к военным кораблям. Характеристики проекта определяются возможностями завода – строителя, распо-

ложенного на реке Волга, оптимизацией расхода топлива и ориентацией на перевозку в первую очередь массовых грузов. Впрочем, в случае отказа заказчика от услуг волжских заводов для строительства морских судов в силу весьма высокой стоимости работ, главные элементы проекта DCV45L будут изменены в более благоприятном для перевозки палубных грузов направлении.

Выводы

Для отечественных судовладельцев необходимы малотоннажные и среднетоннажные сухогрузные суда, характеристики которых должны:

- по осадкам соответствовать отечественным портам с относительно небольшими проходными глубинами (рекомендуется осадка 7,5-8,0 м);
- иметь ледовые подкрепления, достаточные для работы в Балтийском море (рекомендуется ЛУ2-ЛУ4 (аналог 1С-1А в финско-шведских правилах);
- перевозить прокат черных и цветных металлов, слябы, штрипсы, чугун, зерновые грузы, бревна и пиломатериалы, калийные и минеральные удобрения, уголь, бумагу, кокс, металлолом, серу, руды и рудные концентраты, широкую номенклатуру других опасных грузов, как насыпью, так и в упаковке;
- обеспечивать перевозку контейнеров, причем, в том числе 40-футовых контейнеров, высотой до 9,5 футов;
- иметь эксплуатационную скорость, оптимальную для переходов порты СНГ – Китай (при дедейте более 10000 т);
- объединять в себе черты универсального сухогруза, балкера, лесовоза и фидерного контейнеровоза, причем приоритетом является приспособленность к перевозкам массовых грузов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Г.В. *Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска.* – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
2. Логачев С.И., Семидел Л.И., Стреле С.Б. *Некоторые вопросы проектирования малотоннажных многоцелевых судов.* – СПб.: Судостроение, № 10, 1991. – С. 3-8.
3. *Малотоннажные и среднетоннажные морские сухогрузные суда российского и мирового флота: Справочник / ЦНИИ морского флота.* – СПб., 2004. – 448 с.
4. *Судоходство и судостроение (статистика, экономика, цены).* ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. – Вып. 8(35). – СПб., 2006. – 260 с.

Теория и проектирование судов

5. *Технико-экономические характеристики судов морского флота. РД 31.03.01-90.* – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1992. – 232 с.
6. *Wijnolst N., Waals F.A.J. European short sea fleet renewal programme.* – *Proc. of European Shipbuilding, Repairs & Conversion conf.* – London, RINA, 2004. – 6 p.

Надійшла 29.05.08

О КИНЕМАТИКЕ ПОВЕДЕНИЯ СУДНА НА ЯКОРЕ

Приведен анализ особенностей поведения стоящего на якоре судна при внешних воздействиях. Обобщены результаты известных исследований по определению траекторий судна и точки касания якорной цепи с грунтом. Показана возможность оценки и регулирования уровня безопасности судна на якоре с помощью предложенной сводной полярной диаграммы.

Ключевые слова: судно на якоре, кинематика, надежность, регулирование.

Надежность якорной стоянки зависит от целого ряда факторов: интенсивности и направления внешних воздействий (ветер, течение, волнение), глубины и характера грунта в месте стоянки, способа постановки на якорь, типа якоря и его держащей силы, длины вытравленной якорной цепи.

Многофакторная структура безопасности и надежности судна на якоре в конечном итоге сводится к выполнению условий простого неравенства

$$R < T,$$

где R – горизонтальная составляющая вектора равнодействующей всех внешних сил;

T – держащая сила якорной системы.

Равновесие и ориентация судна относительно внешних воздействий и положения якоря, точнее полюса поворота – точки A отрыва цепи от грунта, определяется условием,

$$\sum M = 0,$$

где $\sum M$ – сумма моментов всех внешних сил относительно полюса поворота судна A .

Управлять надежностью якорной стоянки можно двумя путями:

- уменьшением суммы сил внешних воздействий путем регулируемого изменения ориентации судна относительно этих воздействий;
- увеличением держащей силы якорной системы.

Результат управления проявится в кинематике судна.

Известно, что дрейф стоящего на якорю судна начинается рывками в моменты крайних амплитудных отклонений при рыскании судна и будет более вероятным и значительным с увеличением размахов рыскания, вызванным колебаниями внешних воздействий, а также явлением автоколебаний, возникающих под действием постоянного встречного ветра.

Определение и оценка параметров траектории при рыскании судна на якоре составляют актуальную задачу исследования динамики поведения судна при воздействии ветра, течения и волнения.

Для изучения динамики поведения судна на якоре наиболее эффективно использовать достаточно полно разработанные математические модели управляемости судна.

К числу наиболее распространенных относятся частично линеаризованные модели А.М. Басина (1985), Ю.М. Мاستушкина (1981), А.Д.Гофмана (1988), В.Г. Павленко (1979), модель японских инженеров (1988), Р.Я. Першица (1988), Г.В. Соболева (1976), A.Raclif и D. Larke (1980).

К нелинейным относятся математические модели А.П. Тумашика (1978), Ю.Л. Воробьева и Ю.Е. Дробышевского (1991), Т. Шелангевича (1999), J.M. Journee (2001).

Необычная форма модели и нелинейных дифференциальных уравнений движения судна на якоре в полярной системе координат была предложена в работе [3] В.А. Родионова (1983).

Кинематика судна, его траектория определяются решением системы дифференциальных уравнений, т.е. основой и формой представления математической модели системы «судно-якорь-окружающая среда».

Четыре системы координат движения судна на якоре и положения якорной цепи в пространстве показаны на рис. 1 а, б, в.

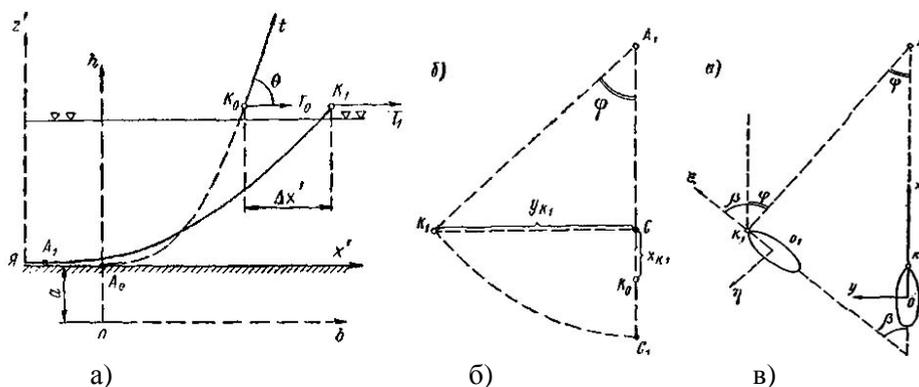


Рис. 1. Используемые системы координат: положения якорной цепи в пространстве вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскости, координат движения судна на якоре (в).

Согласно [1] дифференциальные уравнения движения судна в горизонтальной плоскости в связанной с судном системе координат $\xi O_1 \eta$ могут быть записаны в следующем общем виде:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11})\ddot{\xi} - (m + \lambda_{22})v_\eta \dot{\beta} &= \overline{F}_\xi, \\ (m + \lambda_{22})\ddot{\eta} + (m + \lambda_{11})v_\xi \dot{\beta} &= \overline{F}_\eta, \\ (J + \lambda_{66})\ddot{\beta} - (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_\eta v_\xi &= \overline{M}. \end{aligned} \quad (1)$$

Правые части уравнений (1) удобно представить в виде сумм

$$\begin{aligned} \overline{F}_\xi &= -\overline{P}_{a\xi} - \overline{P}_\xi + \overline{P}_{T\xi}, \\ \overline{F}_\eta &= -\overline{P}_{a\eta} - \overline{P}_\eta - \overline{P}_{T\eta}, \\ \overline{M} &= \overline{M}_a - \overline{M} - \overline{M}_T. \end{aligned} \quad (2)$$

Входящие в выражения (2) слагаемые обусловлены аэродинамическими силами, действующими на надводную часть судна при ветре $\overline{P}_{a\xi}$, $\overline{P}_{a\eta}$, силами натяжения якорной цепи $\overline{P}_{T\xi}$, $\overline{P}_{T\eta}$ и гидродинамическими силами неинерционной природы, действующими на подводную часть судна при его движении \overline{P}_ξ , \overline{P}_η .

В выражениях (2) предусмотрена возможность учета постоянного течения в районе якорной стоянки. Для этого проекции скорости ЦТ судна относительно воды представляются в следующем виде

$$\begin{aligned} v_\xi &= \dot{\xi} + v_0 \cos(\alpha_0 + \beta), \\ v_\eta &= \dot{\eta} + v_0 \sin(\alpha_0 + \beta) \end{aligned} \quad (3)$$

При отсутствии течения величины v_0 и α_0 равны нулю.

Таким образом, непосредственно из уравнений (2) можно определить три неизвестные величины: угол рыскания β и проекции скорости движения ЦТ судна $\dot{\xi}$ и $\dot{\eta}$. В неподвижной системе координат xOy проекции этой скорости будут иметь вид

$$\dot{x}_0 = \dot{\xi} \cos \beta - \dot{\eta} \sin \beta, \quad \dot{y}_0 = \dot{\xi} \sin \beta + \dot{\eta} \cos \beta. \quad (4)$$

Наряду с зависимостью $\beta(t)$ эти функции дают возможность составить достаточно полное представление о явлении рыскания и дрейфа стоящего на якорю судна при действии ветра и течения.

Интегрирование выражений (4) позволяет найти функции времени $x_0(t)$ и $y_0(t)$, определяющие положение ЦТ судна в пространстве.

Для расчетов ветрового воздействия наиболее универсальным и надежным принято считать метод М.А. Ишервуда [9].

Предложенный М.А. Ишервудом метод определения коэффициентов, представленных полиномами, основан на результатах обобщения данных более 600 испытаний моделей различных судов в нескольких лабораториях

Проекция аэродинамических сил на оси связанной с судном системы координат $\xi_1 O_1 \eta_1$ и момент относительно центральной вертикальной оси $O_1 \xi_1$ определяются выражениями

$$\begin{aligned} \overline{P_{a\xi}} &= \tilde{N}_{a\xi}^0 \frac{\rho_0 v^2}{2} Q \cos \beta, \\ \overline{P_{a\eta}} &= \tilde{N}_{a\eta}^0 \frac{\rho_0 v^2}{2} Q \sin \beta, \\ \overline{M_a} &= C_{ma} \frac{\rho_0 v^2}{2} QL. \end{aligned} \tag{5}$$

Для определения гидродинамических сил на корпусе, вызванных течением, составляющие силы \overline{P}_ξ и \overline{P}_η , а также гидродинамический момент \overline{M} , возникающий при вращении судна, рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} \overline{P}_\xi &= \tilde{N}_\xi (\dot{\xi}|\dot{\xi}| + \tilde{v}_\xi |\tilde{v}_\xi|) \frac{\rho F}{2}, \\ \overline{P}_\eta &= \tilde{N}_\eta^0 (\dot{\eta}|\dot{\eta}| + \tilde{v}_\eta |\tilde{v}_\eta|) \frac{\rho F}{2}, \\ \overline{M} &= \tilde{N}_m \dot{\beta} |\dot{\beta}|. \end{aligned} \tag{6}$$

Достоверный и универсальный метод определения гидродинамических коэффициентов разработан Н.А. Анисимовой [8]. Метод основан на результатах систематических продувок серий моделей современных судов при любых углах дрейфа.

В ряду составляющих правой части уравнений (2) наибольшую сложность представляет определение волновой составляющей и силы упругой реакции цепи.

Известно, что динамическое влияние волнения на судно складывается из двух основных составляющих:

- обобщенной возмущающей силы первого порядка (линейной), пропорциональной высоте волны, которая инициирует колебания (качку) судна, с частотой волнения и, как правило, малыми амплитудами;

- обобщенной нелинейной возмущающей силы второго порядка, которая пропорциональна квадрату высоты волны и инициирует нелинейные, второго порядка колебания судна.

Последние, так называемые силы волнового дрейфа, являются результатом воздействия групп волн на плавучий объект.

Они в свою очередь состоят из трех частей:

- постоянной части, вызывающей разворот и смещение плавучего объекта;

- низкочастотной части, зависящей от разницы частот волн, входящих в состав группы волн определенного направления;

- высокочастотной части, зависящей от суммы частот тех же волн.

Последняя составляющая инициирует высокочастотные колебания судна. Так как амплитуды таких сил достаточно малы и находятся вне области собственных колебаний стоящего на якоре судна, их действие обычно не учитывается.

Для рассматриваемой задачи интерес представляют лишь первые две составляющие волновых сил дрейфа. Их оценка представляет самостоятельную проблему. Основой для определения интенсивности подобных воздействий являются классические работы В.Г. Сизова [12], Н. Maruo [13], J. Newman [14], N. Salvesen [15], J. Pinkster [16], и др. Приближенная оценка их влияния может быть произведена на основе теоретических и экспериментальных данных, приведенных, например, в [17].

При определении силы натяжения якорной цепи возникает сложность, вызванная взаимной нелинейной связью между ней и перемещением судна и клюза [6; 7]. Провисающий участок якорной цепи, связывающей судно с якорем, имеет форму цепной линии. Натяжение цепи определяется ее весом, который зависит от удельного веса материала цепи и длины цепной линии.

Линия действия горизонтальной составляющей натяжения T считается лежащей в плоскости провисания цепи.

При рыскании и дрейфе судна якорный клюз находится в движении и длина цепной линии, ее горизонтальная проекция и, как следствие этого, горизонтальная составляющая натяжения непрерывно изменяется.

Учитывая, что горизонтальная составляющая натяжения якорной цепи T оказывает влияние на движение судна в горизонтальной плоскости, необходимо найти зависимость этой составляющей от перемещения якорного клюза.

Такая зависимость силы T от величины перемещения клюза при дрейфе и рыскании судна в безразмерном виде получена в работе [1].

В немногочисленных известных работах задача кинематики судна на якоре решена лишь для случая действия встречного ветра без учета

течения и волнения. При этих условиях в кинематике судна в наиболее выраженной форме проявится явление автоколебаний

Особенности перемещения судна на одном якорю состоят в том, что на при ровном встречном ветре оно будет приведено к такому положению квазистатического равновесия, при котором провисание цепи и диаметр судна окажутся в одной плоскости с вектором воздействия ветра.

При этом судно будет совершать угловые и поступательные перемещения относительно этого квазиравновесного положения в горизонтальной плоскости, т. е. возникнут явления дрейфа и рыскания.

Это явление носит характер автоколебаний, поддерживаемых за счет не обладающего колебательными свойствами источника энергии - ветра, постоянного в данной задаче по направлению и силе.

В процессе автоколебаний судно может двигаться с весьма большими углами дрейфа и значительно отклоняться от положения равновесия [1].

Основной причиной такого явления оказываются существенно нелинейные связи, присущие колебательной системе судно-цепь-якорь-внешняя среда.

В данном случае главными являются нелинейные зависимости горизонтальной составляющей натяжения провисшей цепи от перемещения якорного клюза, а также нелинейные зависимости аэродинамических и гидродинамических сил от кинематических элементов движения судна.

Природа возникновения и механизм поддержания явления автоколебаний судна в рассматриваемой задаче состоит в следующем.

Поведение судна в условиях якорной стоянки будет существенно зависеть от того, является ли указанное равновесное положение устойчивым или нет. Если равновесие неустойчиво, отклонение судна от равновесного положения будет расти и после исчезновения возмущающих воздействий до тех пор, пока натяжение якорной цепи, связанное с отклонением нелинейной зависимостью, не возрастет настолько, чтобы ликвидировать дрейф.

После остановки в момент наибольшего отклонения избыточное натяжение якорной цепи будет вызывать возвращение судна в положение равновесия и при достижении его, вследствие неустойчивости, будет развивать дрейф в противоположную сторону. Таким образом, по существу неустойчивость равновесия судна, удерживаемого якорем на месте, является основной причиной его дрейфа и рысканья, имеющих при воздействии постоянного ветра характер автоколебаний.

Как показывает анализ развернутых уравнений [1] интенсивность автоколебаний при заданной глубине якорной стоянки и скорости ветра определяется степенью неустойчивости равновесия судна и оказывается большей с ростом степени неустойчивости, которая характеризуется позиционной производной коэффициента аэродинамического момента.

При этом степень неустойчивости равновесия будет зависеть от глубины якорной стоянки, а также взаимного расположения клюза и центра парусности по длине судна [1].

Особенности траектории судна относительно линии положения его квазиравновесного состояния, совпадающей с вектором скорости ветра, состоят в следующем.

Известно, что вследствие автоколебаний судна траектория характерных точек судна (положение клюза, центра тяжести судна) будет в горизонтальной плоскости представлять собой кривую линию в форме восьмерки, симметричной при встречном ветре и деформированной при наличии течения [2; 3; 4], рис 2 а.

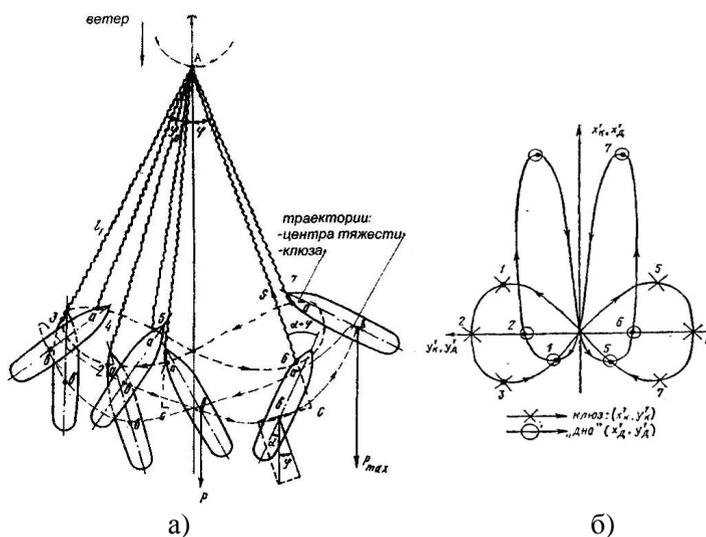


Рис. 2:

- а) траектория судна на якоре при действии ветра;
- б) вид сверху на траекторию движения клюзовой точки («поперечная восьмерка») и траекторию точки А отрыва цепи от грунта дна («вертикальная восьмерка»)

Цифры на траекториях – номера фазы в 1/8 цикла (фазы № 0, 4, 8 соответствуют положению равновесия, отклонение от которого отмечено штрихом)

Принято считать, что полюс поворота – точка отрыва цепи от грунта А неподвижна при заданных внешних воздействиях и мгновенное значение радиуса поворота судна зависит только от перемещения клюза.

Однако, численными исследованиями [2] показано, что полюс поворота судна – точка А подвижна и перемещается по границе пятна также в форме несимметричной восьмерки. При этом траектория клюза и траектория точки А связаны фазовой зависимостью, т. е. каждой точке траектории клюза отвечает мгновенное положение полюса поворота А на границе пятна, рис 2 б.

Как ранее уже отмечалось, управлять надежностью якорной стоянки можно *уменьшением суммы сил внешних воздействий* путем изменения ориентации судна относительно этих воздействий.

Вопрос об уменьшении величины воздействий таким способом и тем самым повышении надежности якорной стоянки практически не исследован.

При действии постоянного по скорости и направлению *ветра* судно будет приведено им в положение квазистатического равновесия, при котором диаметрально судна и плоскость провисания цепи практически совпадут с вектором встречного ветра.

При совместном воздействии на судно *ветра* и *течения* оно будет ориентировано так, что плоскость провисания цепи совпадет с равнодействующей векторов ветра и течения, полученных с использованием поляр этих воздействий. При появлении третьего фактора – *волнения* необходимо будет, используя его поляр, суммированием определять равнодействующую трех векторов, в плоскость которой поворотом судна будет приведена плоскость провисания цепи.

В любом из этих случаев векторы равнодействующих в плоскости провисания цепи будут проходить через полюс вращения. Этому условию отвечает равенство нулю суммы моментов всех сил, а значит и момента их равнодействующей относительно полюса вращения A , т. к. при этом будет равно нулю плечо равнодействующей.

При заданных значениях направления и интенсивности каждой из составляющих внешних воздействий можно построить поляр их равнодействующей вращением блока векторов при сохранении углов между ними. Такой прием подобен повороту судна в системе истинных координат вместе с полярами при сохранении истинных направлений внешних воздействий (ветра, течения, волнения).

До сих пор шла речь о естественном неуправляемом движении и положении судна относительно внешних воздействий.

Регулировать натяжение цепи, управляя положением судна относительно внешних воздействий при постановке на один якорь практически невозможно.

При постановке на два носовых якоря регулирование будет ограниченным и слабоуправляемым относительно внешних сил.

Задачу управления ориентацией судна можно решить только при постановке его на один якорь методом «на шпринг» или на носовой и кормовой якоря. Ведутся разработки систем автоматической стабилизации положения судна с помощью подруливающих устройств и винторулевых колонок.

Из всех известных основных способов наиболее эффективным для управления натяжением цепи является способ постановки «на шпринг». Изменяя длину шпринг-троса, можно придавать судну любое положение относительно внешних воздействий поворотом его вокруг полюса поворота A .

При действии внешних сил произвольного направления судно будет поворачиваться до тех пор, пока равнодействующая, совпадающая с плоскостью провисания цепи не пройдет через полюс поворота – точку *A*.

Была предложена [5] сводная полярная диаграмма, для контроля и регулирования безопасности якорной стоянки. Диаграмма включает поляры всех трех факторов и нанесенными на поле диаграммы *границными* концентрическими окружностями радиусами, равными держащей силе якоря на разных грунтах (песок, ил, глина, галька, камень), рис. 3.

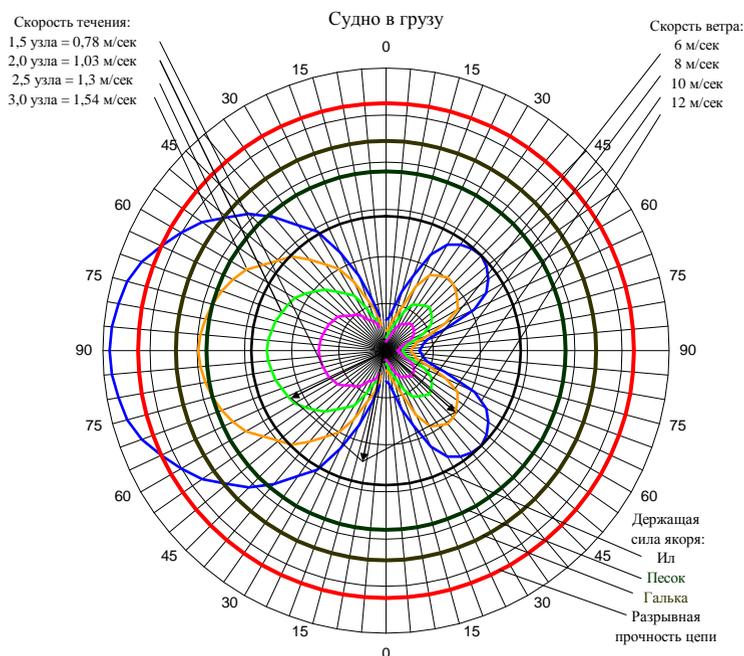


Рис. 3. Диаграмма для оценки безопасности якорной стоянки

Предложенная диаграмма позволяет решить три задачи:

1. Определять равнодействующую всех действующих на судно сил путем векторного сложения их составляющих.

2. Оценивать безопасность якорной стоянки путем сравнения их равнодействующей с радиусом граничной окружности, т.е. с держащей силой якоря на конкретном грунте.

3. Регулировать натяжение якорной цепи путем целенаправленного изменения ориентации судна за счет длины шпринг-троса до направления минимума поляры равнодействующей внешних сил внутри граничной окружности, т.е. держащей силы якоря на определенном типе грунта.

Первая задача – изменение ориентации судна относительно ветра, волнения и течения возникает при необходимости обеспечить только безопасность стоянки судна без учета других эксплуатационных требований.

Вторая задача состоит в регулировании ориентации судна, в случае необходимости прикрытия корпусом от ветра и волнения других плавсредств, для возможности или удобства проведения ими рейдовых грузовых, бункеровочных операций и сообщений с берегом.

В обоих случаях опасность дрейфа судна на якоре будет контролируемой и оцененной путем сравнения равнодействующей всех внешних сил с держащей силой якоря, т.е. радиусом граничной окружности для каждого типа грунта на стоянке.

Но главное состоит в том, что эта опасность может быть уменьшена или исключена *изменением ориентации судна относительно внешних воздействий*.

Увеличить надежность якорной стоянки можно также путем удлинения вытравленной цепи. Это приводит к увеличению реакции системы якорь-цепь, как за счет роста длины провисания, а значит, и горизонтальной составляющей веса цепной линии, так и за счет увеличения силы трения лежащего на грунте удлиненного участка цепи.

Для исключения опасности обрыва цепи расчетами показано [11], что ее вытравленная часть должна превышать глубину якорной стоянки не менее чем в пять раз, иначе возникает система с короткими связями, вследствие чего снижаются упругие свойства цепной линии с опасностью появления динамического рывка, превышающего разрывное усилие цепи.

Влияние удлинения цепи на кинематику поведения судна проявится в следующих формах. При усилении внешних воздействий за счет роста натяжения часть лежащей на грунте цепи будет подорвана. Удлинится ее провисающая часть, а значит, ее проекция на грунт и радиус циркуляции относительно полюса поворота A . Вследствие этого должен увеличиться радиус перемещения судна при смене направления внешних воздействий, изменятся размеры и деформируются формы описываемой судном (точкой положения клюза, центром тяжести судна, крайней кормовой точкой) траектории в форме восьмерки, расширится ометаемая судном опасная зона.

Таким образом, выявление особенностей кинематики движения судна на якоре позволит повысить безопасность и надежность его стоянки и выполнения рейдовых операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахманин Н.Н. Рыскание и дрейф на якоре при действии ветра и течения / Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. 239. 1967. – С. 83-98.
2. Циммерман Г.Г. Численная модель динамики якорной цепи // Совершенствование судов, устройств и гибких конструкций. – Николаев, 1986. – С. 102-115.

3. Родионов В. А. Уравнение движения корпуса судна, стоящего на якоре под действием ветра // Проблемы морского судоходства: Сб. научн. трудов. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1983. – С.57-61.
4. Жуков Ю.Д., Кузнецов А.И. Влади́нец Г.И., Циммерман Г.Г. Современное состояние якорных устройств морских судов и повышение их надежности. Л.: Судостроение. – 1988. – № 2. – С. 19-22.
5. Бондарь В.В. Метод оценки и регулирования безопасности якорной стоянки судна при действии ветра, волнения и течения // Судовождение: Сб. научн. тр. ОНМА. – Одесса, 2008. – Вып. 15. – С.11-19.
6. Влади́нец Г.И., Тимченко В.М. Методика расчета усилий в якорной системе // Совершенств судовых устройств и гибких конструкций. – Николаев, 1988. – С. 68-72.
7. Коноплев В.А. О воздействии якорных цепей на судно и якорь // Надводные технические средства освоения Мирового океана. – Л., 1978. – С. 35-40.
8. Анисимова Н. И. Позиционные гидродинамические характеристики судов на произвольных углах дрейфа. – Л.: Судостроение 1968. №5 . – С.13-17.
9. Isherwood M.A. Wind Résistance of Merchant Ships. TRINA. 1973. Vol. 155. P. 327-335.
10. Remery G.F.M., van Oortmerssen G. The mean wave, wind and current forces on offshore structures and their role in the design of mooring systems. In Offshore Technology Conference, number OTC 1741, Houston, USA.
11. Дмитриева И. Н., Молодожников А.Б. Особенности расчета качки заякоренных объектов понтонных форм и усилий в якорных связях // Мореходные качества судов и средств освоения океана. – Л., 1986. – С. 24-28.
12. Сизов В.Г. К теории волнового сопротивления судна на регулярном волнении // Вісник Одеського державного морського університету. – Одесса. – 1999.– Вып. 3. – С. 20-38.
13. Maruo H. The Drift of a Body in Floating on Waves. JSR. 1960. Vol. 4. P. 1-10.
14. Newman J.N. The Drift Force and Moment on Ship in Waves. JSR., 1961. Vol. 11. P. 51-60.
15. Salvesen N. Second-Order Steady-State Forces and Moments on Surface Ship in Oblique Regular Waves. International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves. London. 1974. P. 212-226.
16. Pinkster J. Low Frequency Second Order Wave Existing Forces on Floating Structures. NSMB, Wageningen, Netherlands, N650, 204p.

Теория и проектирование судов

17. *Бородай И.К., Мореншильд В.А., Виленский Г.В. и др. Прикладные задачи динамики судов на волнении. – Л.: Судостроение, 1989. – 264 с.*

Надійшла 17.06.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОПРОКИДЫВАНИЯ БАРЖИ-ПЛОЩАДКИ «П-3026»

Рассмотрены причины опрокидывания несамоходной баржи-площадки «П-3026». Это, прежде всего, человеческий фактор, проявившийся в превышении ограничений по допустимой высоте волны; нарушении технологии перевозки сыпучих грузов; неправильной эксплуатации и отсутствии герметичности корпуса.

Ключевые слова: авария, несамоходная баржа-площадка, опрокидывание, ограничение по погоде, аварийная остойчивость, кренящий момент, буксировка

11 мая 2007 года морской буксир «Бурун» с двумя несамоходными баржами П-3114 и П-3026, загруженными 2086 и 2100 т железорудных окатышей, вышел из порта Очаков в порт Южный. Прогноз погоды на начало рейса: ветер юго-западный 6-11 м/с, высота волны 7-12 дециметров. От мыса Сычавский ветер юго-западный 14-18 м/с с порывами до 20 м/с, высота волн до 20 дециметров.

12 мая 2007 года в 01.15 караван стал на якорь в точке 18 рейда порта Южный для приема лоцмана. Погодные условия ветер до 12-14 м/с, порывы до 20 м/с, волна, по показаниям капитана, свыше 20 дециметров. При такой погоде лоцман не смог высадится на морской буксир «Бурун». В 04.30 был замечен крен баржи П-3026 на левый борт. К 05.30 крен увеличился до 15-20°. В 05.43 караван снялся с якоря и курсом 275° начал движение в порт. При движении от рейдовой стоянки к входу в порт крен баржи П-3026 увеличился. Волны заливали палубу, вода попадала в бункер. По рекомендации лоцмана в 06.30 баржа была отцеплена от каравана и оставлена под наблюдением портовых буксиров «Бурун» и «Экватор». В 06.35 баржа П-3026 опрокинулись через левый борт и продолжала плавать в опрокинутом состоянии.

Несамоходная баржа-площадка П-3026 проекта 1021А имеет следующие основные размеры:

- | | |
|------------------------|--------|
| • длина габаритная, м | 84,84; |
| • длина расчетная, м | 82,00; |
| • ширина габаритная, м | 15,20; |

Теория и проектирование судов

| | |
|---|--------|
| • ширина расчетная , м | 15,00; |
| • высота борта, м | 2,80; |
| • летний надводный борт в пресной воде, м | 0,43; |
| • осадка по грузовую марку (пресная), м | 2,38; |
| • водоизмещение по грузовую марку, т | 2490; |
| • водоизмещение порожнем, т | 403. |

Судно спроектировано и построено в 1982 г. на Херсонском ССРЗ и предназначено для перевозки твердых навалочных и генеральных грузов, не боящихся подмочки.

На момент аварии судно имело действующие до мая 2008 года документы Регистра судоходства Украины на класс \star О-пр 2,0 и находилось в пригодном для эксплуатации состоянии.

Исходя из имеющейся документации, были проанализированы обстоятельства аварии и выявлено пять основных нарушений, сделавших ее возможной. Проанализируем их в отдельности.

1. Превышение ограничений по допустимой высоте волны, связанное с неправильной ее оценкой. Район 0-пр смешанного «река-море» плавания [1], допускает эксплуатацию баржи-площадки П-3026 при высоте волны 3% обеспеченности не более 2,0 м и удалении от мест-убежищ не более 50 миль в следующих районах:

На Черном море: 5-мильная прибрежная зона от п. Одесса до Дунайской прорывы (март-октябрь включительно); от п. Одесса до п. Скадовск (март-ноябрь включительно);

На Азовском море: Таганрогский залив до линии коса Долгая-коса Бердянская-п. Бердянск (март-декабрь включительно); 20-мильная прибрежная зона вдоль северо-западного побережья до п. Геничеськ и вдоль восточного побережья до п. Керчь (март-декабрь включительно).

При наблюдениях за мореходными качествами судов в эксплуатационных условиях ограничиваются визуальной оценкой волнения. Регистрируемые таким способом размеры волн зависят от методики наблюдений [2; 3]. Наблюдатель произвольно фиксирует наиболее заметные волны, обеспеченность которых лежит в пределах от 5 до 20%. В иностранной практике визуальную оценку связывают со «значительными волнами», средняя высота и период которых совпадают с соответствующими элементами одной трети наиболее высоких волн. Обеспеченность высот значительных волн – около 14%. Приблизительно можно считать, что наблюдатель, ориентируясь на значительные волны, отмечает только те из них, высота которых на 30% меньше высоты волн с обеспеченностью 3%.

Перейти от визуально оцененной высоты волны к высоте волны 3% обеспеченности можно, используя зависимость

$$h_{3\%} = \frac{h_{1/3}}{0,758},$$

где $\bar{h}_{1/3}$ визуально зафиксированная высота волны.

Таким образом, визуально зафиксированное у мыса Сычавский и на рейде порта Южный, волнение высотой 2,0 метра соответствует высоте волны 3% обеспеченности 2,64 м, что существенно выше разрешенной.

2. Груз был погружен с нарушениями технологии перевозки сыпучих грузов. По объяснениям капитана, груз был размещен вдоль бункера, а угол погрузки груза был больше 30°. Принимать в таком состоянии судно к буксировке капитан не имел права.

Согласно «Инструкции по погрузке-выгрузке несамоходных барж площадок 1564-02-79» груз с углом естественного откоса от 10 до 34° должен «... равномерно укладываться в поперечном направлении» (п.3.1). Если это условие не выполнено, то при крене судна вероятно смещение груза. При крене 8° (согласно «Информации об остойчивости»), появление которого реально при перевозке груза с удельно-погрузочным объемом 0,4 м³/т может произойти его пересыпание, приводящее к смещению центра тяжести примерно на 0,5 м (рис.1), что дает изменение ординаты центра тяжести судна y_g на величину 0,42 м.

$$y_g = \frac{P_{ГРУЗА} \cdot y_{gГРУЗА}}{\Delta_0 + P_{ГРУЗА}} = \frac{2100 \cdot 0,5}{403 + 2100} = 0,42 \text{ м.}$$

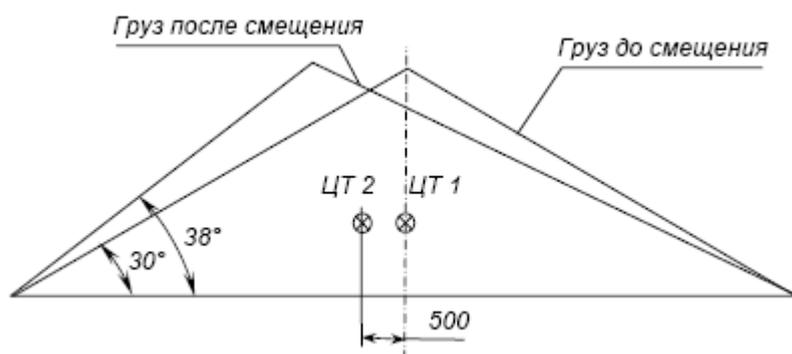


Рис. 1. Схема смещения груза

Расчет остойчивости, выполненный для случая смещения груза показал, что в этом случае судно приобретает крен около 4°. Диаграмма статической остойчивости судна со смещенным грузом приведена на рис. 2. При таком угле крена палуба входит в воду.

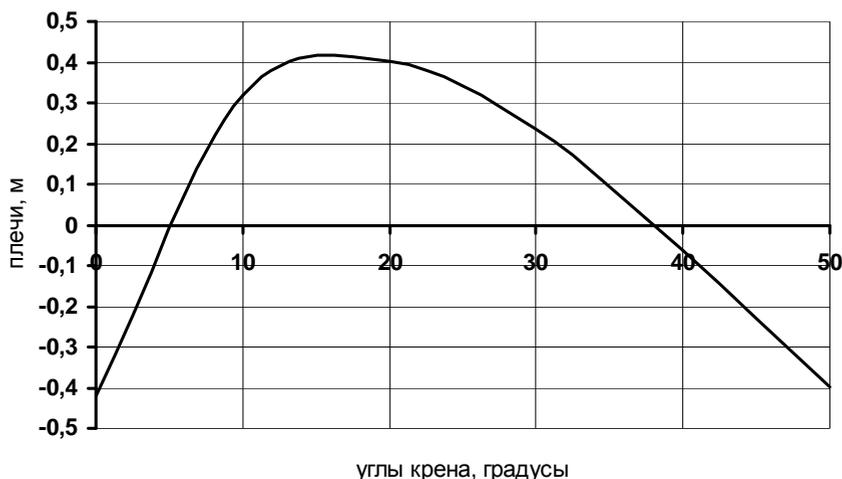


Рис. 2. Диаграмма статической остойчивости после смещения груза

3. Задвижки для оттока воды из бункера были закрыты. В результате этого вода, попадающая в грузовой бункер, не стекала за борт, а накапливалась. Следствием этого явилось возникновение свободной поверхности и, как результат, снижение остойчивости и увеличение крена. Кроме этого, при закрытых задвижках комингс бункера до момента его входа в воду работает как борт судна (рис. 3).

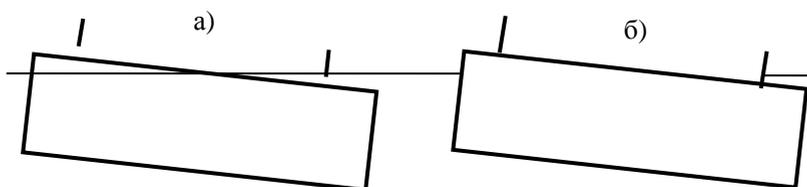


Рис. 3. Схема работы комингса грузового бункера:
а – задвижки открыты; б – задвижки закрыты

На рис. 4 приведены диаграммы статической остойчивости (ДСО) без учета и с учетом комингсов бункера. Видно, что учет комингса значительно увеличивает остойчивость. При входе комингса в воду происходит резкое уменьшение восстанавливающего момента. С учетом этого фактическая диаграмма статической остойчивости имеет скачок при угле входа верхней кромки ограждения бункера (на рис. 4 показана жирной линией).

В статике корабля общепринятым является подход, при котором уменьшение восстанавливающего момента можно трактовать как увеличение кренящего (рис. 5).

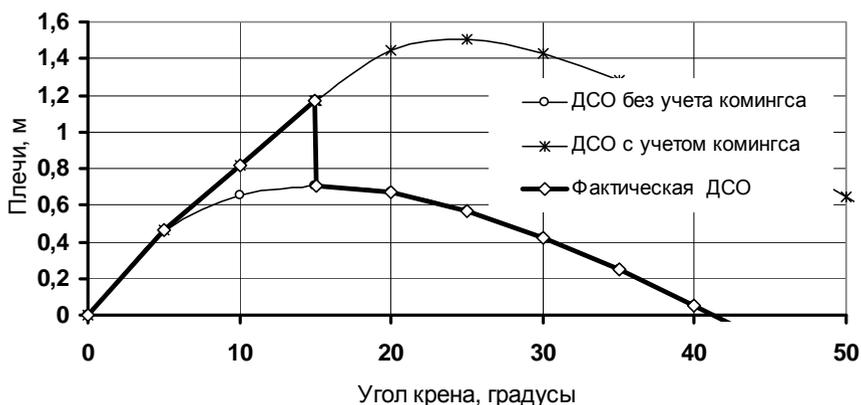


Рис. 4. Диаграммы статической остойчивости с учетом работы комингса грузового бункера

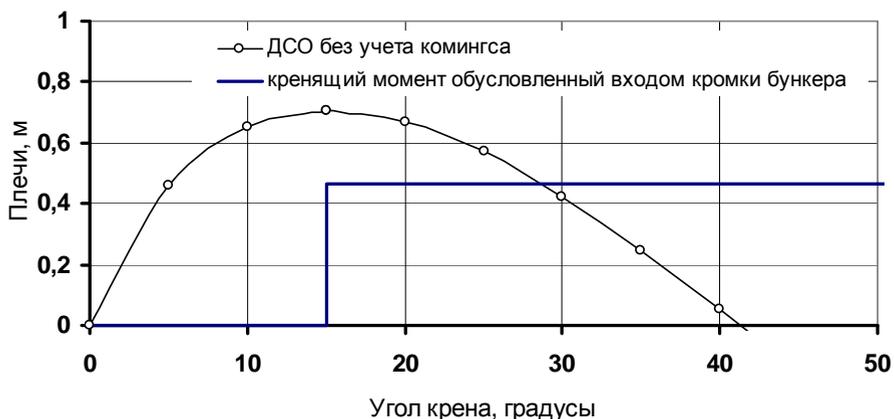


Рис. 5. Кренящий момент, обусловленный входом верхней кромки грузового бункера

Из этого следует, что в момент входа грузового бункера в воду на аварийное судно действовал дополнительный динамически приложенный кренящий момент.

По свидетельству капитана буксира, при наличии груза невозможно визуально определить открыты задвижки для стока воды или нет. Невозможность контроля состояния задвижек у загруженной баржи является её серьезным конструктивным недостатком.

В специальной литературе [4; 5] описание такого опасного эффекта автором не найдено.

4. Нарушение герметичности корпуса судна. Согласно акту на выполненные 17 мая 2007 г. ООО «СДТР» водолазные работы по обследованию аварийной баржи-площадки П-3026 установлено, что судно находится на плаву, опираясь на грунт двумя точками: фундаментом мачты в носу и монорельсом в кормовой части. Днищевая часть баржи выступает над водой на 1,0-2,5м.

Наружная обшивка судна имеет многочисленные бухтины и вмятины. Обрастание отсутствует.

Швартовные устройства баржи-площадки (кнехты, клюзы) повреждений не имеют. Оба носовых якоря находятся на штатных местах. Буксирных канатов на грунте в районе судна не обнаружено.

В ходе обследования подводной части баржи-площадки выявлены следующие повреждения наружной обшивки:

- пробоина 27,0 x 4,0 см, правый борт, район форпика, 2,0 м от основной плоскости, 0,6 м в корму от форштевня; края пробоины загнуты во внутрь;
- волосяная трещина со смещением кромок длиной 25см, левый борт, 2,25 м от основной плоскости, 2,0 м в корму от носовой марки углубления;
- пробоина 25,0 x 3,0 см, левый борт, 2,2 м от основной плоскости, район якорного клюза; края пробоины загнуты во внутрь, сохранились следы заделки пробоины паклей;
- свищ, транец, правый борт, 4,0 м от ДП, 0,2 м от палубы.

Анализ свидетельствует о том, что последние два повреждения имелись до выхода судна в рейс.

Наличие пробоины в форпике и ее состояние позволяет сделать вывод, что в нем постоянно находилась вода – ее объем до уровня пробоины 66 м³. Это означает, что, приняв 2100 груза, судно вышло в рейс с превышением грузоподъемности и утопленной грузовой маркой, что является грубейшим нарушением требований всех нормативных документов.

Другие повреждения могли быть получены в результате аварии.

Положение перевернутого аварийного судна свидетельствует о том, что закрытия сухих отсеков или/и водонепроницаемые переборки были негерметичны. Среднее расстояние от ватерлинии до днища на миделе у опрокинутой «П-3026» составляет 1,74 м. Разность между водоизмещениями при полном погружении баржи ($d = 3,08$ м) и при осадке 1,74 м равна водоизмещению опрокинутой баржи. Оно составляет 1423 т. При выполнении расчета предполагалось, что надстройки баржи не герметичны, поэтому не учитывались объемы бака и юта. Плотность воды принималась 1,010 м³/т.

Согласно «Информации об остойчивости и прочности несамостоятельной баржи-площадки «Н/С3026» проекта 1021А при перевозке твердых навалочных грузов» водоизмещение баржи порожнем составляет 403 т.

Таким образом, внутри корпуса находилось 1423-403=1020 т забортной воды. Объяснить наличие такого количества воды можно только тем, что не все горловины сухих отсеков были задраены. В материалах расследования нет упоминания о возникновении дифферента баржи. Это возможно при накоплении воды в воздушных отсеках симметричных относительно миделя, например, № 5 и № 6 левого борта или иной аналогичной комбинации. Затопление их и форпика через

пробоины не приводит к значительному дифференту. На рис. 6 представлены диаграммы статической остойчивости при затоплении до уровня 0,20 и 0,40 метра воздушных отсеков № 5 и № 6 левого борта.



Рис. 6. Диаграммы статической остойчивости после смещения груза и затопления сухих отсеков № 4 и 5 на 0,20 и 0,40 м

5. Буксировка от рейдовой стоянки к входу в порт велась без учета фактических погодных условий. Воздействие волн на судно зависит не только от их размеров, но и от направления их набегания на судно. При юго-западном (180-225°) направлении ветра и волнения буксировка аварийной баржи от рейдовой стоянки к входу в порт Южный шла курсом 275°, под воздействием ветра и волнения в борт судна. В таких условиях высока вероятность возникновения резонанса бортовой качки судна, кроме того, ветровой кренящий момент максимален. При выходе судна на мелководье увеличивается крутизна волны. Все это приводит к усилению заливания, дальнейшему смещению груза и опрокидыванию.

Опрокидывание баржи-площадки П-3026 произошло из-за сочетания ошибок и нарушений, первопричиной которых явился человеческий фактор. В результате анализа выявленных нарушений, их взаимодействия и значимости, были выделены два основных фактора, непосредственно приведшие к аварии баржи П-3026. Это отсутствие герметичности корпуса и нарушение ограничений района плавания.

Исследование позволило восстановить наиболее вероятную картину развития событий. Судно вышло в море с пробоиной в форпике. При попадании в погодные условия, не предусмотренные районом плавания – переходе и стоянке в ожидании лоцмана в условиях волны 3% обеспеченности высотой около 2,6 метра, превышающей допустимую высоту равную 2 метрам, произошло смещение груза и началось затопление сухих отсеков.

Моделирование опрокидывания баржи показало, что авария вероятнее всего возникла при затоплении сухих отсеков левого борта в районе миделя и форпика. Смоделированный при этом крен соответствует

реально возникшему. Из-за закрытых задвижек для стока воды ситуация усугубилась попаданием и накоплением воды в грузовом бункере. Это привело к увеличению кренящего момента, а остойчивость судна из-за наличия свободных поверхностей ухудшилась, что привело к дальнейшему росту крена. При буксировке аварийной баржи к входу в порт был выбран неблагоприятный курс относительно ветра и волны, что повлекло опрокидывание.

Все эти факторы сгруппировались при вынужденной стоянке на рейде п. Южный, причиной которой стала невозможность ввода каравана из двух барж в защищенный от волны порт без посторонней помощи.

Не вдаваясь в вопросы, связанные с уровнем компетенции персонала, с точки зрения автора глубинной причиной аварии является несовершенство организационной составляющей эстафетной технологии буксировки, когда баржи передаются от одного буксира к другому, а капитаны буксиров практически лишены возможности контролировать и влиять на технические аспекты подготовки буксируемых объектов (невозможно было убедиться в герметичности палубы и проконтролировать состояние задвижек для стока воды из бункера). Фактически они вынуждены отвечать за нарушения, допущенные на более ранних этапах.

Кроме этого, имеет место конструктивный недостаток баржи пр. 1021А – невозможность контроля состояния задвижек для стока воды из грузового бункера у загруженной баржи. Конструкцию задвижек следует изменить, а опасные эффекты связанные с этим недостатком, должны быть отражены в нормативных документах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Правила класифікації та побудови морських суден: Регістр судноплавства України.* – К., 2002. – 1670 с.
2. *Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении.* – Л.: Судостроение, 1969. – 432 с.
3. *Гирс И.В., Русецкий А.А., Нецветаев Ю.А. Испытания мореходных качеств судов.* – Л.: Судостроение, 1965. – 239 с.
4. *Семенов-Тянь-Шанский В.В. Статика и динамика корабля.* – Л.: Судостроение, 1973. – 608 с.
5. *Аксютин Л.Р., Благовещенский С.Н. Аварии судов от потери остойчивости.* – Л.: Судостроение, 1975. – 200 с.

Надійшла 14.05.08

УДК 519.872:624.137.4

В.А. Гришин
А.В. Гришин

ЗАЩИТА СКЛОНОВ ОТ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Дано новое решение задачи расчета волнолома как системы, состоящей из сооружения, грунта и водной среды. Используется ее более совершенная упруговязкопластическая модель. Система находится под действием как статических, так и динамических волновых нагрузок.

Ключевые слова: *склоны, оползни, подводные волноломы, буны, стены, упруговязкопластическая среда, волновая нагрузка.*

Имея дело с морем, нужно всегда помнить о том, что оно требует уважение к себе.

*Виллард Баском
«Волны и пляжи»*

Для защиты Одесского побережья от волновых воздействий были возведены берегоукрепительные сооружения. Основным их назначением является стабилизация склонов от оползневых процессов и защита пляжей. Современный вид одного из таких склонов, который неоднократно напоминал о себе грандиозными оползнями, приведен на рис. 1.



Рис. 1. Склон на мысе Большой Фонтан

Так жить на склонах и ожидать следующего оползня, как показано на рис. 2, могут только очень храбрые люди или те, кому кроме этого опасного жилья некуда больше податься.

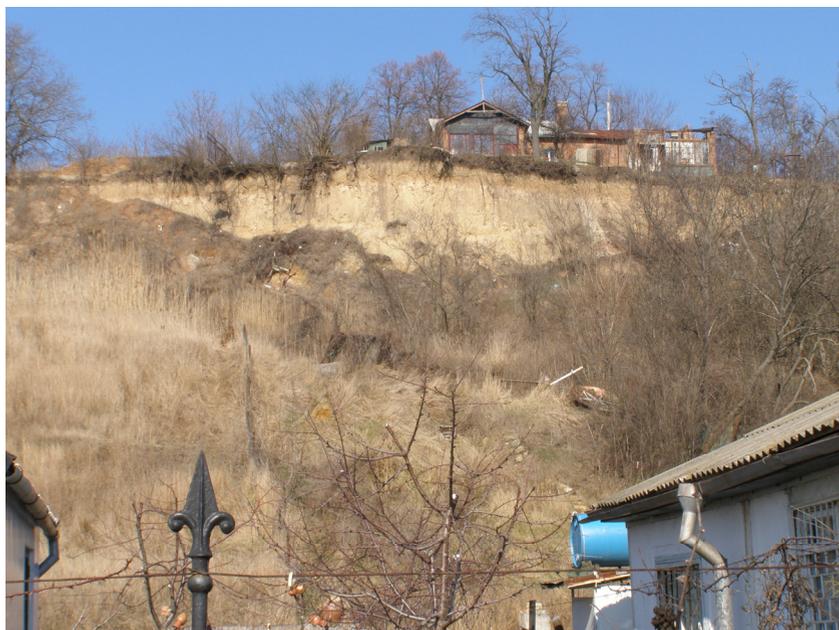


Рис. 2. Одесские склоны и оползни

Ряд неудачных конструкций берегоукрепительных сооружений были отмечены в ранее опубликованных работах авторов, например [1; 2]. Имея дело с морем, никто не застрахован от его непредсказуемых шалостей и несерьезных к нему отношений, которые оно не прощает. Рассмотрим дополнительно несколько примеров из этой области. Сначала напомним очевидную истину, что за построенными сооружениями необходимо следить и правильно эксплуатировать, иначе выполненная работа будет аннулирована волнением. На рис. 3 видно разрушение части буны, примыкающей к берегу. Пляж размыт, волны подмыли ее основание и она переломилась. И это только начало, новые трещины, пока еще не очень большие, уже появились на продолжении буны. Если бы за пляжем следили и во время его пополняли песком, то этого бы не случилось.

Еще один пример о бунах. Вследствие неправильного устройства каменной постели головная часть буны оказалась подмытой и треснула по швам уложенных массивов, как показано на рис. 4. Возможна и другая версия. Вследствие колебаний буны и основания от действия волн произошло разжижение песка, которое вызвано неправильно запроектированной под ней опять же постели, и, как следствие, неравномерная осадка буны и появление трещин.



Рис. 3. Разрушение подмытой буны



Рис. 4. Головная часть буны треснула

Недостаточность наносов, перемещающихся вдоль Одесской береговой зоны, предусматривает регулярное пополнение пляжей, играющих основную роль защиты склонов от волн, привозным песком. На следующем рис. 5 показана подпорная стена, к которой, вследствие размыва пляжа, приблизилось море и его волны начали свою разрушительную ра-

боту. Эта стена не предназначена для их отражения, ее прямолинейная внешняя грань допускает выброс большого количества воды от волновых всплесков на застенную площадку, которая видна на рисунке. Она увеличивает давление на стену, разрушает покрытие и затем вымывает засыпку. Другая часть воды всплесков, падая вниз, увеличивает размыв грунта перед стеной. Если не принять меры, то дни ее существования сочтены. В некоторых случаях для спасения стены перед ней, как показано на рис. 6, производят наброску бетонных массивов, которые на некоторое время спасают положение. Но затем массивы под динамическим воздействием волн погружаются в разжиженный песок, как это видно на рисунке, и перестают играть защитную роль для стены.

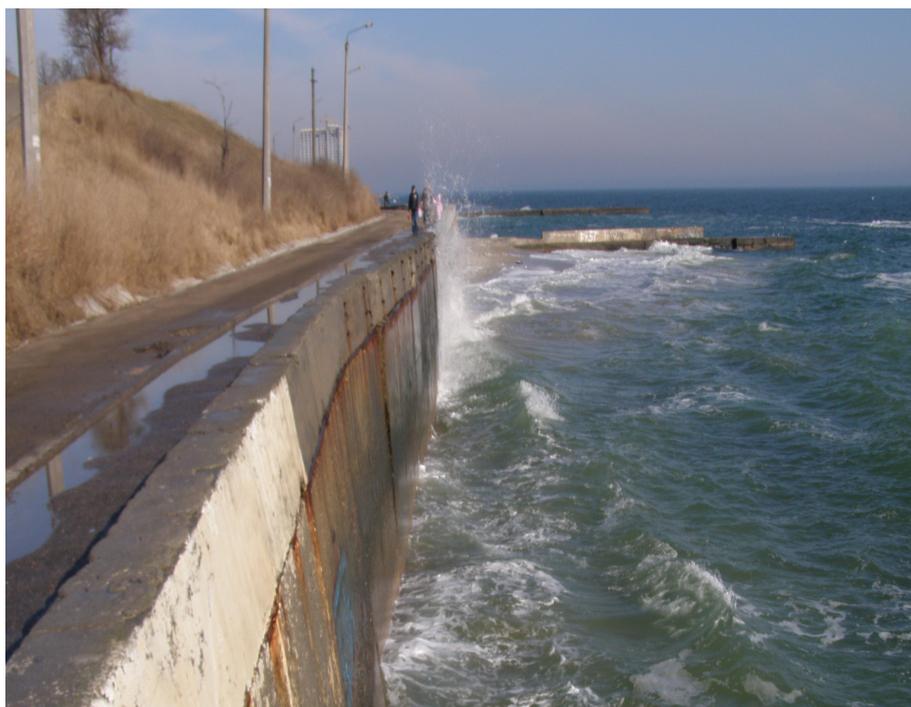


Рис. 5. Размыв песка перед стеной

Укрепление берегового откоса ступенчатой конструкцией без ее прикрытия от волн со стороны открытого моря не всегда оправдано. На рис. 7 показано, что делает море с такой конструкцией. Ее массивы ступеней и плиты покрытия расстроены, некоторые из них сброшены в море, а верхняя часть волноотбойной стены, выполненная из слоистых плит, что нельзя делать без соответствующих креплений, разрушена. Во время штормов ступени конструкции забрасываются галькой, обломками массивов и водорослями, что не способствует улучшению санитарных условий и безопасности отдыхающих.

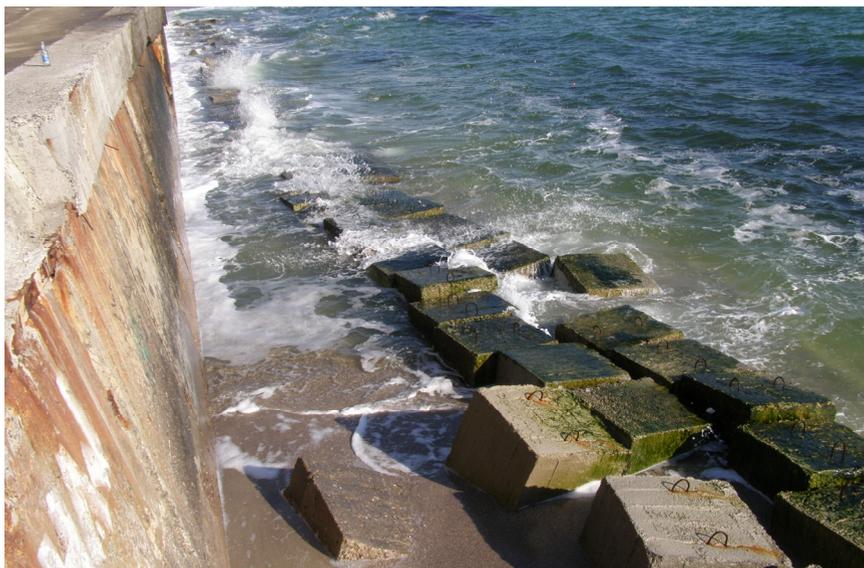


Рис. 6. Укрепление стенки массивами



Рис. 7. Разрушение ступенчатой конструкции

Укрепление откоса вокруг мыса Большой Фонтан железобетонными плитами и набросными бетонными массивами для их защиты, показанное на рис. 8, нельзя признать, мягко говоря, удачным. Если при проектировании считали, что этот участок побережья должен быть только защищен от воздействия волн и, что здесь не должно быть пляжа, то такое решение, учитывая стоимость земли на побережье и дефицит пляжей в

летнее время года, неразумно. Попробуйте Вы, одолеваемые знойным солнцем, в роли отдыхающего войти без травм с этого берега в море, когда оно даже немножко волнуется, и удачно вернуться обратно. Чтобы запретить по причине получения травм вольнолюбивым гражданам Одессы и приезжим гостям здесь купаться, то сколько нужно иметь пешей и конной милиции, чтобы это мероприятие обеспечить. Можно было бы решить задачу укрепления берега, учитывая интересы отдыхающих, более рационально.



Рис. 8. Укрепление берега в районе мыса Большой Фонтан

Укрепление незащищенного морского побережья железобетонными плитами, которые находятся под действием волн и в штормовую погоду испытывают большие динамические нагрузки, также нельзя признать удачным. Более солидные по возрасту одесситы видимо помнят, в какое хаотичное состояние под действием волнения превратилась часть пляжа Ланжерон, покрытая до Отечественной войны бетонными плитами. В момент удара волны происходят сложные гидродинамические процессы, которые способствуют вымыванию грунта под основанием плит. Это особенно проявляется при их малейшем расстройстве или при их неточной укладке. В результате, после нескольких штормов плиты вначале получают неравномерную осадку, затем разрушаются, и наблюдается примерно такая картина, как показанная на рис. 9. Такой пейзаж не украшает побережье.



Рис. 9. Разрушение волнами укрепления откоса, покрытого плитами

На рис. 10 можно наблюдать, как даже небольшие волны монотонно воздействуют на плиты пляжа Ланжерон, верхнее покрытие которых ими уже повреждено, но в основном они пока держатся.



Рис. 10. Трудно покрытию плит противостоять натиску волн

Необратимые абразионные процессы, происходящие на Одесском побережье, направлены на разрушение береговых склонов. Так, на участке Большого Фонтана длиной 10 км с 1969 г. по 1980 г. минимальный снос в море осадочного материала только с клифов составил

102000 м³/год (1977 г.), а максимальный 727600 м³/год (1973 г.). Размыв берега в районах, где наблюдаются оползневые явления, влечет за собой их активизацию, распространяя разрушение побережья на большие пространства вглубь материка. Основным фактором разрушения морских береговых склонов и гидротехнических берегоукрепительных сооружений являются морские волны. Определение нагрузок, возникающих от их воздействия на берега и гидротехнические сооружения, базируется на той или иной теории ветровых волн. Эти вопросы достаточно подробно рассмотрены в работах [1; 3; 4].

Расчетная модель берегоукрепительных сооружений представляет собой сложную систему, включающую само сооружение, контактирующую с ним грунтовую и водную среды. Построение и расчет таких нелинейных моделей, находящихся под воздействием волновых и других статических и динамических нагрузок, наиболее полно исследовано в монографии [1]. Но одна интересная проблема, связанная с разжижением песчаных оснований под сооружениями от динамического воздействия морских волн, оставалась не рассмотренной. Поэтому здесь сделана первая попытка исследовать некоторые вопросы этой сложной проблемы.

Сначала немного истории. Начиная с 1933 года, по инициативе Е. Е. Китрана, в районе Ланжерона на расстоянии 100 м от берега непосредственно на песчаное дно были уложены параллельно береговой линии 110 бутобетонных массивов весом каждый по 17 т, которые остались после переустройства одного из портовых причалов. Длина таким образом сооруженного волнолома составляла 250 м, ширина 2,6 м, высота 1,47 м, а начальная глубина залегания массивов принималась на 1,41 м ниже ординара. Интересно отметить, что в процессе строительства в ночь с 13 на 14 декабря 1933 г. происшедшим штормом северная еще не защищенная половина пляжа была подвергнута серьезному разрушению. Наносы были полностью смыты в море, волноприбойная терраса и береговой массив обрыва сильно размыв, а каменная облицовка берега разрушена. Между тем, в южной половине бухты, которая находилась под защитой уже уложенных на дно массивов, отмыв берега не произошел, а наоборот, образовался широкий песчаный пляж. После завершения строительства северная половина Ланжероновского пляжа также пополнилась песчаными наносами. Все это подтверждало положительную роль волнолома по защите морского побережья от волновых нагрузок. Затем под динамическим воздействием морских волн массивы этого волнолома начали погружаться в песчаное дно. Вначале этот процесс происходил достаточно быстро, но со временем он замедлился. Так, за первые 5 месяцев погружение составило в среднем по 8 см в месяц, а в последующие 5 месяцев только в среднем по 4 см в месяц. Такое уменьшение их осадок видимо было вызвано уплотнением под ними песка. Максимальный наклон массивов в сторону моря не превышал 10⁰ и в течение нескольких первых лет после постройки их ряд сохранял устойчивое

положение в плане. Затем массивы постепенно погрузились в слой песка и были замыты. Одна из основных причин разрушения волнолома заключалась в неудовлетворительной подготовке основания под массивы, которая вызвала его разжижение.

Приведем еще один пример разрушения гравитационной стены мола, происшедшей в октябре 1892 г. [5]. На начало аварии массивы стены высотой 6 м были уложены на протяжении свыше 100 пог. м. Грунт в ее основании состоял из очень мелкого песка. Высота волн начавшегося с утра шторма достигала 3,5-4,0 м. В 12 часов дня стена еще стояла, но через несколько минут она была разрушена. После шторма обнаружили, что стена полностью погрузилась в грунт, ее массивы оказались на глубине более 2 м от поверхности дна. Провели эксперимент, на дно положили массив и стали сообщать ему ряд толчков. Под влиянием колебаний массив начал погружаться в грунт, изображая происшедшую аварию стены. Ее причиной стало разжижение песка в основании стены от динамического воздействия морских волн. В те времена вопрос разжижения грунтов был не изучен, но по предложению портостроителя П. С. Чеховича при восстановлении мола предлагалось забить два ряда шпунтовых свай по бокам стены, что соответствовало современному рациональному мероприятию по ее укреплению. В дальнейшем это было сделано и, мол благополучно эксплуатируется до настоящего времени. Другие примеры разрушения сооружений, связанные с разжижением грунтов, приведены в [6; 7; 11]. Следует также отметить, что это явление наблюдается и способствует значительным разрушениям при землетрясениях [9].

Вопросами разжижения водонасыщенных песчаных грунтов начали серьезно заниматься в бывшем Союзе после аварии грунтовой плотины Свирьстроя в 1935 г. [6]. Вследствие произведенного взрыва перемычки на расстоянии 150 м от этой плотины часть ее грунта пришла в разжиженное состояние, и она была частично разрушена. Это явление, происшедшее в песчаных грунтах от динамических воздействий, было на некоторое время засекречено и замедлило его изучение. Дальнейшие исследования в этом направлении велись Н. М. Герсевановым, Н. Н. Масловым, В. А. Флориным, М. Н. Гольдштейном, П. Л. Ивановым, Г. М. Ляховым, А. Casagrande и другими учеными [6; 7; 8; 9]. В 1935 г. А. Casagrande и И. В. Яропольский предложили теорию разжижения песков в зависимости от их плотности, которая получила название «Критической пористости». В это же время Н. Н. Масловым была начата разработка новой теории [6], которая была им названа «Фильтрационная теория динамической устойчивости водонасыщенных песков». С 1949 г. в Ленинградском политехническом институте были проведены крупные исследования по разжижению грунтов при динамических воздействиях под руководством В. А. Флорина и П. Л. Иванова [7]. На Украине этими вопросами занимались М. Н. Гольдштейн, А. А. Вовк, В. Г. Кравец,

Г. И. Черный и другие ученые [9]. Современное состояние этой проблемы изложено в работах [7; 8; 9].

Сущность разжижения водонасыщенного песка состоит в следующем. При динамическом воздействии песок приходит в движение, стремясь к интенсивному уплотнению, которое сопровождается выдавливанием излишней воды из его пор. В процессе этого гидродинамического эффекта зерна песка теряют свой вес и, как следствие, ослабляется и даже полностью пропадает трение между его частицами. Вся масса песка, лишенная трения, приобретает свойства жидкой среды, которая растекается, вызывает всплытие расположенных в ней сооружений или наоборот способствует погружению лежавших на ней конструкций. Условие нарушения структуры песка по В. А. Флорину в общем случае определяется уравнением состояния, которое зависит от пористости, напряжения и собственного веса песка, а также от действующей на него нагрузки, ускорения колебаний и градиента напора фильтрационного потока. В ряде случаев некоторые из этих многочисленных факторов имеют второстепенное значение и могут быть опущены. К сожалению, многие критерии, определяющие разжижение песчаных грунтов, еще мало изучены.

В настоящее время наиболее разработанными теориями, объясняющими разжижение песков, являются, отмеченные выше, «Критической пористости» и «Фильтрационная теория». Также разжижение песчаных грунтов может определяться на основе расчетов их консолидации с учетом виброползучести скелета грунтов и способом взрывного зондирования.

Критической называется пористость, при которой конечная пористость образца после сдвига остается равной начальной пористости до сдвига. Автор теории А. Casagrande ввел гипотезу, которая утверждает, что водонасыщенные песчаные грунты, имеющие пористость выше критической, могут переходить в разжиженное состояние. Ее серьезные недостатки были отмечены в работах Н. Н. Маслов и В. А. Флорина [6; 7]. В настоящее время экспериментально обосновано утверждение, что критерий критической пористости непригоден для оценки возможности разжижения песчаных грунтов при динамических воздействиях [7].

«Фильтрационная теория» была подтверждена большим количеством лабораторных и полевых экспериментов. Согласно этой теории, для определения границы потери водонасыщенными песками своей устойчивости необходимо, во-первых, знать критическое значение интенсивности динамического воздействия, которое характеризуется критическим ускорением $a_{кр}$. Понятие этого ускорения отвечает той критической интенсивности колебаний, когда песок, находящийся до этого в стабильном состоянии, начинает снова уплотняться. Для более точного определения критического ускорения песков Одесской береговой зоны, которые для этого почти не изучены, необходимы эксперименты, методики выполнения которых подробно изложены в работах [6; 7]. Можно также

воспользоваться эмпирическими формулами, предложенными различными авторами и приведенными в этих же монографиях. Вторым важным понятием, которое наиболее трудно определяется, является расчетное ускорение частиц $a_{рас}$ в толще водонасыщенного песка. Эти величины можно находить экспериментально или в наиболее общем случае из расчетов, теория которых в настоящее время с учетом нелинейных свойств грунтовых сред при динамических волновых воздействиях не разработана. Здесь и будет рассмотрен второй подход, позволяющий более точно определять ускорение частиц. В качестве критерия возможности перехода песка в разжиженное состояние принимается следующее неравенство «Фильтрационной теории»:

$$a_{рас} \Rightarrow a_{кр} . \quad (1)$$

Исследуем подводный волнолом, нелинейная расчетная модель которого приведена в монографии [1]. Она представляет собой систему, которая включает сам волнолом, его грунтовое основание и водную среду. Его схема изображена на рис. 11.

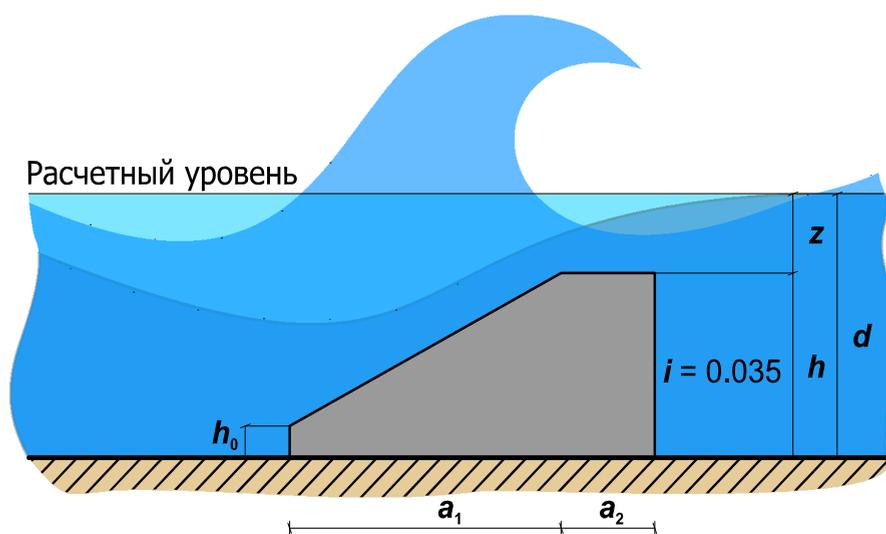


Рис. 11. Подводный волнолом

Рассматриваемый подводный волнолом, был испытан в натуральных условиях в районе Одесской волноисследовательской станции [10]. Его размеры: $h_0 = 0,25$ м, $h = 2,9$ м, $a_1 = 4,4$ м, $a_2 = 0,6$ м. Глубина воды на месте установки волнолома $d = 3,5$ м, а над гребнем $z = 0,6$ м. Высота волны

$h_{5\%} = 3$ м, ее средняя длина $\lambda_{cp} = 29$ м, а средний период $T_{cp} = 5$ с. Уклон дна равен $i = 0,035$. характеристики грунта основания: $E = 30$ МПа, $\mu = 0,3$, $\varphi_0 = 30^\circ$, $c = 0,003$ МПа. Характеристики бетона волнолома: $E = 30000$ МПа, $\mu = 0,2$, $\sigma_p = 1,3$ МПа, $\sigma_c = 17$ МПа. Действующая нагрузка принимается из эпюры волнового давления при 1% – ой обеспеченности, которая построена по результатам натуральных наблюдений на Одесской волноисследовательской станции. Этот пример при статическом воздействии волн был подробно исследован в монографии [1].

Здесь рассматривается случай, когда гребень волны находится над наклонной гранью волнолома и затем происходит его воздействие на волнолом не в виде статической нагрузки, а удара, что и наблюдается в натуральных условиях. Для определения расчетного ускорения частиц песчаного основания используется его динамическая расчетная модель, разработанная в [1]. Разжижение песчаного грунта будет определяться по «Фильтрационной теории».

Для решения задачи определения расчетного ускорения $a_{рас}$ применяется метод Ньюмарка, который реализован по неявной схеме. В матричной форме в момент времени t_{n+1} уравнение движения системы можно представить в следующем виде [1]

$$\bar{\mathbf{K}}\delta_{n+1} = \mathbf{R}_{n+1}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{K}} &= \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} \bar{\mathbf{M}} + \frac{\beta}{\alpha\Delta t} \mathbf{C} + \mathbf{K}, \\ \mathbf{R}_{n+1} &= \mathbf{Q}_{n+1} + \bar{\mathbf{M}} \left[\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} \delta_n + \frac{1}{\alpha\Delta t} \dot{\delta}_n + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\delta}_n \right] + \\ &+ \mathbf{C} \left[\frac{\beta}{\alpha\Delta t} \delta_n + \frac{1}{\alpha} (\alpha - \beta) \dot{\delta}_n + \frac{\Delta t}{2\alpha} (\beta - 2\alpha) \ddot{\delta}_n \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathbf{K} – матрица жесткости системы;

\mathbf{C} – матрица демпфирования;

$\bar{\mathbf{M}}$ – приведенная матрица масс;

$\delta_n, \dot{\delta}_n, \ddot{\delta}_n$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений;

α, β – коэффициенты метода Ньюмарка.

Алгоритм решения упругопластических задач существенно отличается от алгоритма решения линейных задач по следующим причинам:

1. Пластические деформации определяются в приращениях, поэтому уравнение (2) будут содержать в левой части не δ_{n+1} а вектор приращения узловых перемещений $\Delta\delta_{n+1}$

2. При численном решении уравнения (2) в приращениях в каж-

дый момент времени происходит накопление различных ошибок округления, поэтому в правой части этого уравнения будет вместо вектора \mathbf{R}_{n+1} входить вектор невязки, который имеет следующий вид:

$$\Delta \mathbf{R}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} + \overline{\mathbf{M}}\delta_{n+1} - \mathbf{C}\dot{\delta}_{n+1} - \mathbf{K}(\delta)\delta_{n+1}. \quad (4)$$

Поэтому необходимо строить дополнительный итерационный процесс для уменьшения этой невязки до наперед заданной малой величины.

3. При приближенном решении полный вектор напряжений может выходить за пределы области, ограниченной поверхностью нагружения, что в упругопластических задачах недопустимо. Поэтому необходимо строить процедуру возвращения этого вектора в указанную область. Для итерации $i+1$ вектор узловых перемещений определяется как

$$\delta_{n+1}^i = \delta_{n+1}^i + \Delta \delta_{n+1}^i. \quad (5)$$

Итерационный процесс на i -ой итерации заканчивается, если выполняется условие

$$\frac{\|\Delta \delta_{n+1}^i\|}{\|\delta_{n+1}^i + \Delta \delta_{n+1}^i\|} \leq \varepsilon_0, \quad (6)$$

где ε_0 – наперед заданная точность решения.

Общий алгоритм решения по неявному методу выполняется в такой последовательности:

1. Задаются исходные данные: геометрические параметры системы; тип решаемой задачи; механические характеристики материалов системы и грунтов; временные параметры; действующие нагрузки; начальные напряжения; приложенные сосредоточенные массы.

2. Формируется матрица сосредоточенных или распределенных масс, матрица присоединенных масс и матрица демпфирования.

Строится цикл по моментам времени t_1, t_2, \dots, t_N . Пусть определены все данные для момента времени начиная от t_1 до t_n . Необходимо произвести вычисления для t_{n+1} . Для этого организуется итерационный процесс по параметрам $i = 1, 2, \dots$

3. Определяются значения $\delta_{n+1}^i, \dot{\delta}_{n+1}^i, \ddot{\delta}_{n+1}^i$. При $i = t_1$ они находятся из начальных условий

$$\delta_1 = \bar{\delta}; \quad \dot{\delta}_1 = \bar{\dot{\delta}}; \quad \ddot{\delta} = 0.$$

4. Вычисляются элементы матрицы $\bar{\mathbf{K}}(\delta_{n+1}^i)$. Если используется метод касательных жесткостей, то эта матрица определяется при каждом значении i , иначе, в зависимости от модификации метода решения, только для некоторых значений i .

5. Определяется вектор невязки (вектор эффективной нагрузки).

6. Выполняется процедура возвращения вектора напряжений в область, ограниченную поверхностью нагружения. Формируется матрица жесткости $\bar{\mathbf{K}}$, если используется метод касательных жесткостей, в противном случае она берется из предыдущей итерации.

7. Решается уравнение для определения приращений узловых перемещений.

8. Определяются исправленные значения векторов перемещений, скоростей и ускорений по формулам

$$\delta_{n+1}^{i+1} = \delta_{n+1}^i + \Delta\delta_{n+1}^i,$$
$$\dot{\delta}_{n+1}^{i+1} = (\delta_{n+1}^{i+1} - \bar{\delta}_{n+1}) / [\beta(\Delta t)^2],$$
$$\ddot{\delta}_{n+1}^{i+1} = \ddot{\delta}_{n+1}^i + \Delta t \beta \dot{\delta}_{n+1}^{i+1}.$$

9. По формуле (6) делается проверка сходимости итерационного процесса. Если она не выполняется, то параметр i увеличивается на единицу и осуществляется возврат к шагу 3. При выполнении условия (6) определяются следующие значения:

$$\delta_{n+1} = \delta_{n+1}^{i+1}, \quad \dot{\delta}_{n+1} = \dot{\delta}_{n+1}^{i+1}, \quad \ddot{\delta}_{n+1} = \ddot{\delta}_{n+1}^{i+1}.$$

Цикл по i заканчивается, временная переменная увеличивается на единицу, и процесс решения начинается с шага 3. Если $t = t_N$, то решение задачи окончено.

Приведенный алгоритм реализован в программном комплексе, описание которого дано в монографии [1].

Критическое ускорение колебаний $a_{кр}$ обычно находится по результатам виброкомпрессионных испытаний. Точных данных определения $a_{кр}$ для намывных песков Одесской береговой зоны нет. Поэтому на основании обширных натуральных и экспериментальных данных, приведенных в [6; 7] для различных песчаных грунтов, принимается для данного примера наиболее подходящее значение $a_{кр} = 5 \text{ см/с}^2$.

Выполненные на ЭВМ расчеты показали, что полученное расчетное ускорение $a_{рас}$ в узловых точках конечных элементов оказалось меньше критического ускорения ($0 < a_{рас} \leq 3 \text{ см/с}^2$), т. е. разжижение

песков не должно происходить, что противоречит приведенным выше реальным примерам. Однако необходимо отметить, во-первых, волновая нагрузка принималась как осредненная величина, в натуральных условиях она может отклоняться как в большую, так и в меньшую стороны. Во-вторых, как показано в работе [12], при ударе волны могут возникать «игловые» мгновенные нагрузки интенсивностью свыше 5λ , где λ – высота волны. Время их действия составляет 0,002-0,005 с, а повторяемость не превышает 5-8 %. Были выполнены различные расчеты на такие динамические нагрузки, которые показали, что в некоторых узловых точках конечных элементов основания возникают расчетные ускорения, превышающие величину критического ускорения $a_{кр}$ ($0 < a_{рас} \leq 8 \text{ см/с}^2$). Следовательно, в песчаном основании под волноломом могут образовываться области, в которых происходит его разжижение. Со временем эти области расширяются, и массивы волноломов постепенно погружаются в песчаное основание.

Какие мероприятия следует выполнять для предотвращения таких негативных явлений? В наиболее общем случае они перечислены в работах [6; 7; 9; 11]. Применительно к рассматриваемому случаю необходимо под массивы волнолома устраивать каменную постель. Хотя процесс разжижения и уплотнения несвязанных грунтов не зависит от их гранулометрического состава, но с увеличением крупности, а, следовательно, и водопроницаемости, уменьшается время их пребывания в разжиженном состоянии. При разрушении структуры небольших слоев крупнозернистых грунтов это время так мало, что в них практически не наблюдается проявлений разжижения [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин В. А., Снисаренко В. И. *Нелинейные модели берегоукрепительных сооружений*. – К.: МП Леся, 2007. – 272 с.
2. Гришин В. А., Гришин А. В. *Анализ оползней на склонах Одесского побережья // Вісник ОНМУ*. – 2008. – Вип. 24. – С. 20-37.
3. Гришин В. А., Снисаренко В. И., Федорова Е. Ю. *Берегоукрепительные волнозащитные стены // Вісник ОНМУ*. – 2007. – Вип. 23. – С. 89-105.
4. Гришин А. В., Федорова Е. Ю. *Нелинейная динамика ограждающих сооружений*. – Одесса: ОНМУ, 2002. – 239 с.
5. Шафир И. Н. *Причины повреждений портовых ограждающих сооружений*. – М., – Л.: Морской транспорт, 1950. – 360 с.
6. Маслов Н. Н. *Условия устойчивости водонасыщенных песков*. – М., – Л.: Государственное энергетическое изд., 1959. – 328 с.
7. Иванов П. Л. *Разжижение песчаных грунтов*. – М., – Л.: Государственное энергетическое изд., 1962. – 260 с.
8. Вовк А. А., Смирнов А. Г., Кравец В. Г. *Динамика водонасыщенных грунтов*. – К.: Наукова думка, 1975. – 202 с.

Гидротехнические сооружения

9. Ишихара К. *Поведение грунтов при землетрясениях.* – СПб., 2006. – 383 с.
10. Лызов И. А., Натальчишин Г. Д. *Опыт работы первой натурной волноисследовательской станции по изучению взаимодействия волн с берегоукрепительными волноломами // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 66.* – Л.: Энергия, 1971. – С. 184-190.
11. Гольдштейн М.Н. *Внезапное разжижение песка // Вопросы геотехники. Сб. 1.* – М.: Гос. изд. по строительству, 1953. – С. 5-41.
12. Жданов А. М. *Волновые нагрузки, действующие на морские берегоукрепительные сооружения.* – М.: ЦНИИСК, 1958. – 75 с.
13. Иванов П. Л. *Грунты и основания гидротехнических сооружений.* – М.: Высшая школа, 1991. – 447 с.

Надійшла 21.05.08

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОРТОВЫХ КРАНОВ ДЛЯ МОРСКИХ ПОРТОВ УКРАИНЫ

Проведены сравнительные исследования основных параметров портовых кранов выпускаемых в стране и за рубежом. Определены критерии выбора портовых кранов применительно к особенностям причальных сооружений морских портов Украины.

Ключевые слова: *портальный кран, мобильный кран, грузоподъемность, вылет стелы, масса крана, шарнирно-сочлененная стреловая система.*

Наряду с интенсивным развитием контейнерных перевозок, внедрением перегрузочных комплексов непрерывного транспорта, до 70% грузовых работ в морских и речных портах выполняются универсальными перегрузочными комплексами с крановой схемой механизации грузовых работ, преимущественно порталными кранами. В общем комплексе парка порталных кранов до 90% составляют порталные краны с шарнирно-сочлененной стреловой системой.

Износ парка порталных кранов превышает 96%. Срок службы отдельных кранов достигает 40-50 лет, что в несколько раз превышает нормативный, граничный эксплуатационный ресурс.

Средний коэффициент использования парка кранов по отрасли составляет $K_{исп} = 0,29$. Около 40% кранов работают с $K_{исп} = 0,0-0,15$.

Темпы старения парка кранов отрасли значительно опережают темпы обновления.

В сложившейся ситуации решение проблемы обновления парка портовых кранов может осуществляться только через внедрение крупных инвестиционных проектов, как в существующие порты, так и в новые строящиеся порты и причалы через внедрение современных образцов портовых кранов с учетом передового зарубежного опыта.

К сожалению, во многих, даже строящихся портах, часто по традиции внедряются старые технологии с использованием оборудования «секондхенд», морально устаревших и физически изношенных порталных кранов бывших в употреблении с остаточным ресурсом близким к списанию.

Архитектура причальных сооружений в наших портах в большинстве своем не всегда позволяет применять современные технологии с

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

мобильными кранами, которые интенсивно внедряются последние 15-20 лет в зарубежных портах, в связи с чем в статье сделана попытка анализа достоинств и недостатков порталных кранов, выпускающихся в стране и за рубежом, которые могли бы повысить эффективность перегрузочных процессов в морских и речных портах Украины.

Критерии выбора порталного крана

В таблицах 1 и 2 приведены основные технические параметры портовых кранов ведущих краностроительных фирм, которые претендуют на техническое перевооружение наших портов.

Приведенные типы порталных кранов (табл. 1) являются серийными, проверенными в эксплуатации. Они обладают параметрами, которые были заданы в свое время в технических требованиях на их изготовление. Но все они по-разному соответствуют как эксплуатационным требованиям, так и современным тенденциям в краностроении, таким как снижение металлоемкости и энергопотребления, применение современных материалов и технологий, встроенных систем тестирования и диагностирования, снижения плановых простоев на ремонте и техническом обслуживании.

Рассмотрим некоторые достоинства и недостатки порталных кранов, которые выпускаются в стране и за рубежом.

Критериями эффективности крана являются грузоподъемность, вылет, масса крана, скоростные режимы, режим работы, стоимость крана. Одним из критериев эффективности конструкции крана является показатель, характеризующий отношение массы крана к его грузоподъемности – «плотность мощности», т.е. масса крана, которая конструктивно обеспечивает одну тонну грузоподъемности. Данный показатель определяет уровень применения современных технологий, которые были заложены при создании крана.

Общий анализ показывает (рис. 1), что характеристики порталных кранов с прямой стрелой по всем показателям значительно лучше, чем у порталных кранов с шарнирно-сочлененной стреловой системой:

- грузоподъемности кранов в крюковом режиме выше более чем в два раза;
- грузоподъемности кранов в грейферном режиме выше в 1,5-4,0 раза;
- показатель «плотность мощности» выше в 2-5 раза;
- нагрузки на ходовое колесо снижаются от (21,6-39,0) т до (18,0-22,0) т.

На рис. 1 приведен характер изменения технических характеристик порталных кранов различных фирм, по таким параметрам как масса крана, грузоподъемность в крюковом и грейферном режимах, вылет стрелы крана.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Таблица 1

Сравнительные характеристики портальных кранов

| № п/п | Параметр | Краны с шарнирно-сочлененной стрелой системы | | | | Краны с прямой стрелой | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--|--|-------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Саморомонтак | | Клаудиа Ebelzwalde | | Конкретинс Украна | | Gottwald | | Liebherr | | | | | | | | | | |
| | | Стриж | Аист | Витязь | Альбат-рос | Сокол | Кондор | АНС-2000 | Марк 25 | Марк 40 | Марк 45 | HSK 170 EG | HSK 200 EG | HSK 300 EG | HSK 360 EG | LPS-180-E | LPS-280 | LPS-400 | LPS-530 | |
| 1 | Грузоподъемность шкв крана, т - грейфер, т - спредер, т - магнит, т | 10/20 10 16 - | 16/32 16 - | 40/63 20 - | 10/20 - | 16/32 16 16 | 32/40 16 16 | 35/63 50 - | 25/32 16 25 | 40 16 16 | 40 18 - | 40 18 - | 63 32 - | 100 н/д н/д | 100 н/д н/д | 120 н/д н/д | 64 35 41 | 84 52 41 | 104 52 - | 104 75 - |
| 2 | Вылет шкв, м | 30 | 32 | 32 | 32 | 36 | 32 | 50 | 36 | 34 | 45 | 40 | 44 | 50 | 56 | 35 | 38 | 48 | 51 | |
| 3 | Режим работы | A8 | A8 | A8 | A7 | A7 | A7 | - | A7 | - | - | A8 | A8 | н/д | н/д | A8 | A8 | A7 | A7 | |
| 4 | Масса крана, т | 145 | 220 | 370 | 183 | 254,6 | 371 | 707 | 314 | 390 | 464 | 300 | н/д | н/д | н/д | 245 | 265 | 510 | 520 | |
| 5 | Скорости - подъема, м/мин - поворота, об/мин - вылета, м/мин | 64-90 1,6 1,5-2,15 64 | 64-90 1,6 1,4-1,7 64 | 64-90 1,6 1,6 60 | 63-32 1,6 63 | 63 1,6 63 | 63 1,6 63 | 40 1,6 40 | 110 1,6 - | 63 1,6 - | 32/63 1,6 63 | 32/63 1,6 - | 70 1,4 45 | 85 1,6 50 | н/д н/д н/д | н/д н/д н/д | 64 1,6 65 | 90 1,6 46 | 90 1,6 87 | 70 1,6 87 |
| 6 | Шаг ина колеи, м | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 15,1 | - | - | - | 10,5 | 10,5 | 10,5 | н/д | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 15,3 | |
| 7 | Нагрузка на ходовое колесо, т | 22,5 | 22,5 | 23 | 23,4 | 21,6 | 25,5 | 39 | 24,6 | 25 | 26,2 | н/д | н/д | н/д | н/д | 18 | 22 | 20 | 20 | |
| 8 | Плотность мощности (масса крана, которая обеспечивает 1 т грузоподъемности) | 14,5/7,25 | 13,7/7,25 | 9,25/5,9 | 18,3/9,15 | 15,9/7,9 | 9,3 | 20,2/11,2 | 12,5/9,8 | 9,75 | 11,6 | 9,3 | н/д | н/д | н/д | 3,8 | 3,1 | 4,9 | 5,0 | |

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**

Таблица 2

Сравнительные характеристики мобильных кранов

| № п/п | Параметр | Мобильные краны | | | | | | | | | |
|-------|---|---------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------|----------------|-----------------|-----------------|--|--|
| | | Liebherr | | | | | Gettrald | | | | |
| | | LHM-180 | LHM-280 | LHM-320 | LHM-400 | LHM-600 | HMK 90 E | HMK 170 E | HMK 260 E | | |
| 1 | Грузоподъемность шпал кранов, т - грейфер, т - спрейер, т - магнит, т | 64 30 41 - | 84 52 41 - | 104 43,3 - 43,3 | 104 43,3 95,25 43,3 | 208 90 41 - | 18 - | 63 32 - | 100 40 - | | |
| 2 | Вылет шпал, м | 35 | 40 | 43 | 48 | 58 | 30 | 38 | 44 | | |
| 3 | Режим работы | A7 | A7 | A7 | A7 | A7 | нет данных | нет данных | нет данных | | |
| 4 | Масса крана, т | 163 | 240 | 320 | 390 | 540 | 129 | 240 | 300 | | |
| 5 | Скорости - подъема, м/мин - поворота, об/мин - вылета, м/мин | 90 1,6 65 | 90 1,6 46 | 90 1,6 36 | 90 1,6 41 | 120 1,6 100 | 140 2 50 | 78 1,4 45 | 85 1,6 50 | | |
| 6 | Плотность, мощности (масса крана, которая обеспечивает 1 т грузоподъемности) | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 3,7 | 2,5 | 7,1 | 3,8 | 3,0 | | |

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Приведенные зависимости, построенные на параметрах серийных кранов, позволяют определить тенденцию снижения или увеличения массы крана при изменении таких параметров, как грузоподъемность и вылет стрелы. Анализ показывает (рис. 1, кривые I, II), что серийные образцы кранов с шарнирно-сочлененной стреловой системой достигли своих предельных значений по таким параметрам как максимальная грузоподъемность, масса крана и вылет стрелы, и дальнейшее повышение грузоподъемности кранов такого класса будет связано с значительным увеличением массы крана.

Например, порталный кран «Марк-45» («Конекрейнс Украина») с максимальным вылетом стрелы 45 м, при грузоподъемности 40 т, имеет массу крана 464 т. При этом, порталный кран «АНС-2000» («Kranbau Eberswalde») с максимальной грузоподъемностью 63 т при максимальном вылете 30 м, для указанной грузоподъемности, имеет массу крана более 700 т.

Указанные выше максимальные параметры порталных кранов с шарнирно-сочлененной стреловой системой с большим запасом перекрываются порталными кранами с прямой стрелой, при снижении массы крана от 707 т «АНС-2000» («Kranbau Eberswalde») до 520 т, «LPS-530» («Liebherr»), причем максимальная грузоподъемность крана «LPS-530» увеличивается в 1,5-2,5 раза, и составляет 104 т.

Следует отметить, что порталные краны с шарнирно-сочлененной стреловой системой типа «Альбатрос», «Сокол», «Кондор», «Марк-25», «Марк-40», «Марк-45» имеют грейферный режим с максимальной грузоподъемностью всего до 18 т (кривые I, II), а порталные краны с прямой стрелой типа «LPS-180», «LPS-400», «LPS-530», «LPS-600» имеют грейферный режим с грузоподъемностью от 35 до 75 т.

В настоящей статье наряду с характеристиками порталных кранов, приведены сравнительные характеристики порталных и мобильных кранов. На рис. 1 (кривая IV) для сравнения приведены технические характеристики мобильных кранов для крюкового и грейферного режимов. Сравнительные характеристики порталных и мобильных кранов отличаются на порядок. Например, если в наших портах грейферный режим порталных кранов характеризуется максимальной грузоподъемностью 18 т, то в мобильных кранах он достигает 75 т. Если крюковой режим наших серийных кранов характеризуется грузоподъемностью максимум 40 т, то в мобильных кранах она достигает 140-208 т. Кроме вышеизложенного мобильные краны обладая мобильностью, позволяют создавать принципиально новые технологии грузовых работ с высоким коэффициентом использования кранов. Например, в Новороссийском порту, где применяются мобильные краны, коэффициент использования таких кранов достигает $K_{исп} = 0,8$, в то же время в наших портах средний коэффициент использования порталных кранов по отрасли не превышает $K_{исп} = 0,29$. Например, Одесский порт имеет $K_{исп} = 0,22-0,23$.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

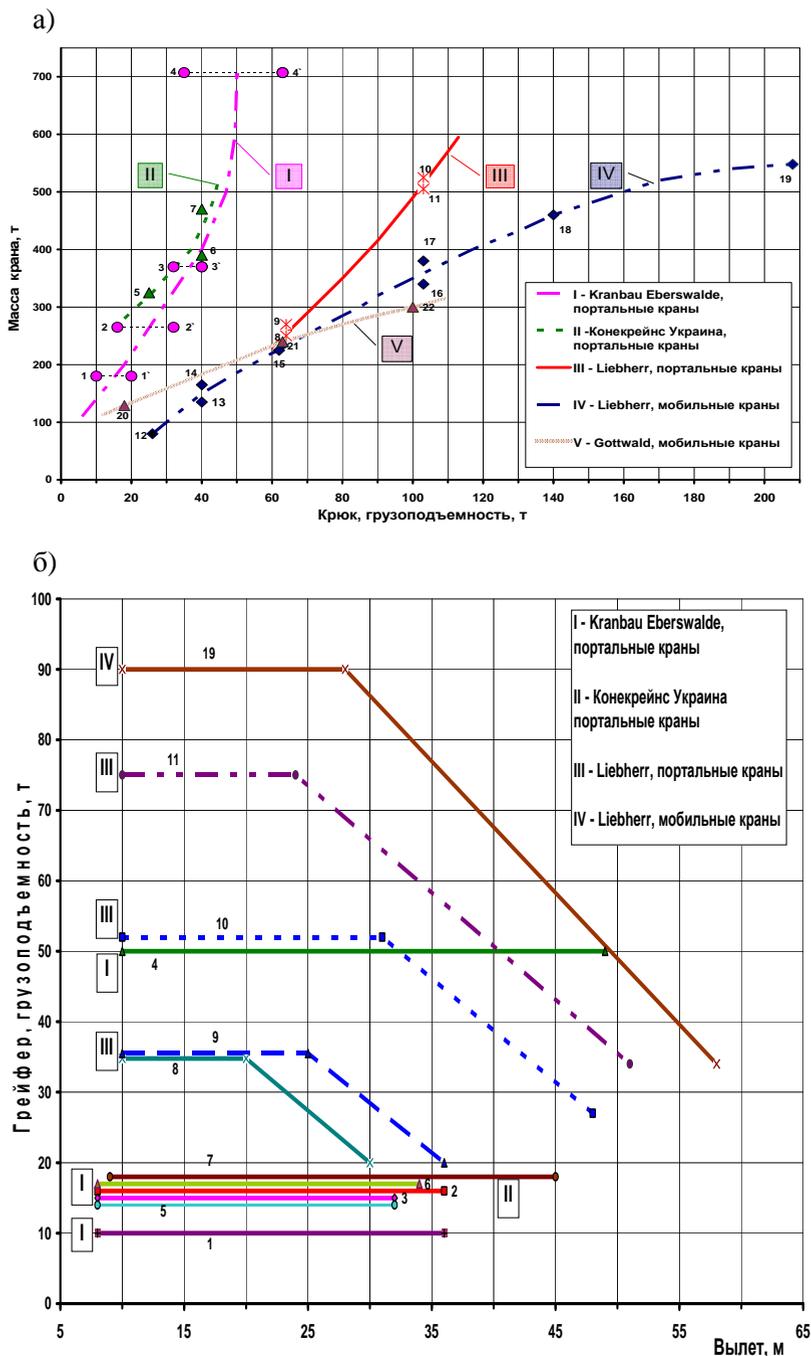


Рис. 1 (а, б). Сравнительная характеристика портовых кранов по параметрам: масса крана; грузоподъемность в крюковом режиме; грузоподъемность в грейферном режиме; вылет стрелы крана

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Примечание:

Портальные краны: 1 – Альбатрос 10/20; 2 – Сокол 16/32; 3 – Кондор;
4 – АНС – 2000; 5 – Марк – 25; 6 – Марк – 40; 7 – Марк – 45; 8 – LPS –
180; 9 – LPS – 280; 10 – LPS – 400; 11 – LPS – 530;

Мобильные краны: 12 – LHM – 70; 13 – LHM – 100; 14 – LHM – 150;
15 – LHM – 280; 16 – LHM – 320; 17 – LHM – 400; 18 – LHM – 500;
19 – LHM – 600; 20 – НМК 90 Е; 21 – НМК 170 Е; 22 – НМК 260 Е;

Недостатки порталных кранов с шарнирно-сочлененной стреловой системой

Результаты анализа показывают, что шарнирно-сочлененная стреловая система в порталных кранах скорее традиция нежели экономическая целесообразность.

Изобретена и внедрена в конструкцию кранов она была в середине прошлого столетия. Основным назначением ее было обеспечение горизонтального перемещения крюковой подвески системой рычагов с уравновешиванием стреловой системы подвижным противовесом.

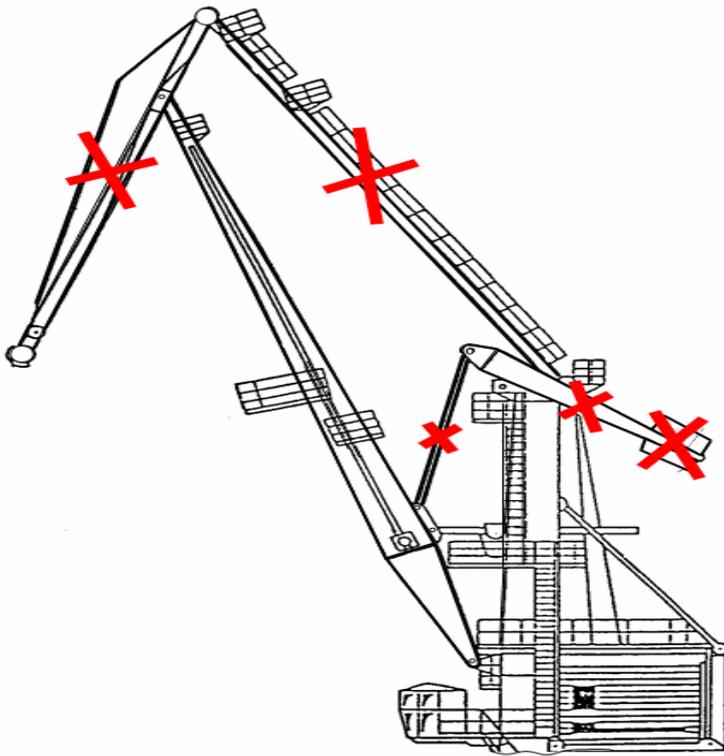


Рис. 2. Шарнирно-сочлененная стреловая система portalного крана

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Причем, масса указанных рычагов (хобот, оттяжка, тяга, коромысло с подвижным противовесом) превышает массу самой стрелы в несколько раз и достигает 60% металлоемкости в общей массе стреловой системы крана (рис. 2; табл. 3).

В современных кранах электронными методами обеспечивается любая траектория перемещения груза, в том числе с учетом совмещения всех операций на максимальных скоростях.

В настоящее время шарнирно – сочлененная стреловая система является морально устаревшей конструкцией, которая значительно увеличивает массу крана.

Для порталных кранов небольшой грузоподъемности увеличение массы крана за счет шарнирно – сочлененной системы сказывается незначительно, а для кранов большой грузоподъемности она становится проблемой, в связи с катастрофическим увеличением металлоемкости крана.

Таблица 3

Весовые характеристики шарнирно-сочлененных стреловых систем порталных кранов, тонн

| № п/п | Элемент стреловой системы | Единицы измерения | Тип порталного крана | | |
|-------|--|-------------------|----------------------|--------|--------|
| | | | Альбатрос | Сокол | Кондор |
| 1 | Хобот | тонны | 4,65 | 8,2 | 11,5 |
| 2 | Тяга | тонны | 0,91 | 1,09 | 1,75 |
| 3 | Коромысло с подвижным противовесом | тонны | 15,22 | 18,235 | 31,05 |
| 4 | Оттяжка | тонны | 2,34 | 2,9 | 3,0 |
| 5 | Стрела | тонны | 11,72 | 14,6 | 23,9 |
| 6 | Общая масса стреловой системы | тонны | 34,84 | 45,025 | 71,2 |
| 7 | Общая масса стреловой системы без стрелы | тонны | 23,12 | 30,425 | 47,3 |
| 8 | Лишний вес | % | 66% | 67% | 66% |

Таким образом в современных конструкциях оптимальной является прямая стрела (фирма «Liebherr», фирма «Gottwald»), где все проблемные вопросы управления решаются электронными методами.

Дополнительные преимущества порталных кранов «Liebherr» серии «LPS»

Наряду с преимуществами по техническим параметрам краны фирмы «Liebherr» серии «LPS» оснащены дополнительными устройствами и имеют ряд других преимуществ:

- питание крана может осуществляться как от внешнего берегового источника по кабелю (электропитание), так и от автономной дизельной установки крана;
- краны оборудованы электронной системой «LITRONIC» со встроенной системой диагностирования всех систем и поиска неисправностей.
- управление краном может осуществляться из двух кабин, верхней (башенной) и нижней (на портале);
- обеспечивается оснащение телевизионной системой наблюдения из верхней кабины, где установлен цветной монитор для контроля за грузом машинистом крана;
- краны оснащаются автоматической системой контроля параметров работы крана, контроля технического состояния всех систем, централизованной системой смазки всех механизмов;
- грузоподъемное устройство крана (крюк, автоматический спредер, механический грейфер) оснащено грузовращателем;
- система управления крана «LITRONIC», обеспечивает контроль работы всех систем, внутренней системы тестирования, диагностирования, обеспечивается быстрый поиск дефектов, в том числе контроль остаточного ресурса компонентов крана;
- перемещение груза краном контролируется системой гашения колебаний на базе «LITRONIC»;
- краны оснащаются модемом для передачи информации о работе крана и его техническом состоянии на расстоянии, что позволяет проводить мониторинг грузопереработки и результатов внутренней диагностики систем крана в режиме «on-line», не покидая офиса;
- за счет плановой замены компонентов крана при плановых технических обслуживаниях исключается необходимость в плановых текущих и капитальных ремонтах, чем достигается высокий коэффициент использования крана на грузовых работах;
- энергозатраты на грузопереработку снижаются до 30% при сравнении с традиционными конструкциями порталных кранов.

Портальные краны фирмы «Liebherr» успешно работают в России, в том числе на Крайнем севере (порт Ванино), в Испании (порты Севилья, Тарагона), в портах Турции и др.

На Украине портовые краны «Liebherr» работают в портах Одесский, Южный, порт «Авлига» оснащен тремя уникальными порталными кранами «LPS-530» (рис. 3) с параметрами по грузоподъемности до 104 тонн.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов



Рис. 3. Портальные краны «Liebherr» серии «LPS- 530», порт «Авлига»

ЛИТЕРАТУРА

1. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных кранов. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса. – М.: Транспорт, 1992. – 256 с.
2. Иванченко Ф.К. Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин. – К.: Вища школа. Головное издательство, 1978. – 576 с.
3. Пустовой В.Н. «Какой кран нужен портам» // Порты Украины. – 2003. – № 2.
4. Марченко В.Г., Пустовой В.Н. Обновление парка портовых кранов морских портов // Порты Украины. – 2004. – № 6 (50). – С. 20-23.
5. Пустовой В.Н. Портовые краны: у критической черты // Порты Украины. – 2005. – № 5 (55). – С. 38-42.
6. Пустовой В.Н. К оценке показателей энергоемкости перегрузочного процесса // Исследования, проектирование и техническая эксплуатация инженерных сооружений и средств механизации морских портов: Сб. научн. тр. М.: ЦРИА «Морфлот», 1981. С. 120-125.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

7. Андриенко А.О. Состояние и перспективные направления обновления парка портовых кранов в морских портах Украины // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2006. – Вип.20. – С.86-89.
8. Андриенко А.О. Исследование влияния металлоемкости портовых кранов на энергоемкость перегрузочного процесса // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2006. – № 2. – С. 105-111
9. Официальный сайт фирмы «Liebherr» – www.liebherr.com
10. Официальный сайт фирмы «Gottwald» – www.gottwald.com
11. Официальный сайт ЗАО «Севмормонтаж» – www.zaosmm.ru
12. Официальный сайт ЗАО «Конекрейнс Украина» – www.konecranes.com.ua
13. Официальный сайт фирмы «KE Kranbau Eberswalde» – www.kranbau-eberswalde.de

Надійшла 15.05.08

МЕТОДИКА ВИДІЛЕННЯ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ МЕХАНІЗМІВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ ПО ПАРАМЕТРАМ ВІБРАЦІЇ

Приведені результати кореляційного й спектрального аналізу вібраційних сигналів з використанням методів статистики стаціонарних випадкових процесів, а також методи виявлення «прихованих» періодичностей, що ґрунтуються на часово-спектральних перетвореннях.

***Ключеві слова:** вібраційні сигнали, стаціонарні випадкові процеси, кореляційна функція, перетворення Фур'є, потужність вібраційного сигналу, амплітудно-частотні характеристики вібраційних сигналів.*

В статті розглянуто методику виділення гармонічних складових вібраційного сигналу для визначення дефектів механізмів портальних кранів типу «Альбатрос», «Сокіл», «Кондор» (фірма виробник «Кранбау Еберсвальде») на прикладі механізму підйому крану «Сокіл».

Конструктивні особливості та режими роботи вказаних кранів ідентичні, та відрізняються величиною вантожопідйемності, геометричними параметрами та вагою саміх кранів.

Традиційні методи діагностування машин по параметрах вібраційних сигналів ґрунтувалися на порівнянні амплітуди сигналу із граничними значеннями, що розділяють бездефектні та дефектні стани. Системи контролю й діагностики, створені на базі цих методів, забезпечують виділення інформативних складових з вимірюваного сигналу й реєстрацію моментів перевищення ними граничних значень. Будь-яке перевищення порогів реєструється як дефект, вид якого визначається по сукупності складових, що перевищили задані для кожної з них пороги.

Сучасні системи моніторингу все частіше використовують методи діагностики не тільки для ідентифікації дефектів, але й для ідентифікації причин тих змін віброакустичного стану машини, які визначаються не дефектами, а умовами роботи. Таке об'єднання завдань моніторингу й діагностики приводить до підвищення якості діагнозу, тому що зміна режиму роботи машини дуже часто змінює багато діагностичних ознак дефектів [1-3].

Як правило, при відборі вібраційного сигналу від конструкційного вузла складного механізму на характер зміни сигналу впливають не тільки сам вузол, від якого відбирається сигнал, а й сусідні елементи.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Вплив заважаючих факторів настільки суттєвий, що приводить до хибних висновків про вібростан об'єкту. Тому остаточне рішення про вібростан об'єкту необхідно приймати на основі поглибленого аналізу вібраційних сигналів, приймаючи до уваги як конструкційні особливості механізму, так і задаючи достовірні параметри обробки вібраційних сигналів.

При відборі та дослідженні віброакустичних сигналів використовувались спеціалізовані прилади та програмне забезпечення.

Діагностика системи «електродвигун-редуктор» проводилась віброаналізатором «КВАРЦ» (відбір сигналів віброшвидкості та віброприскорення) та віброметром «ВУ 095» (виміри загального рівня вібрації механізму).

Обробка сигналів проводилась з використанням спеціалізованого програмного забезпечення «Атлант», «Паллада» та «Аріадна».

Проілюструємо приклад аналізу вібраційних сигналів, відібраних від підшипникових вузлів редуктора підйому порталного крану «Сокіл».

Механізм підйому порталного крана наступний. Лебідка механізма підйому складається з двох барабанів, двох електродвигунів, редуктора, двох гальм. Лебідка змонтована на особистій рамі та встановлена як комплексний агрегат на каркасі обертальної частини крану. Редуктор та опори барабану встановлені на рамі шарнірно, що необхідно для роботи обмежувача вантажопідйомності. Двигуни з'єднані з редуктором втулко-пальцевими муфтами. Редуктор – вертикальний циліндричний двоступінчатий, який складається з двох однакових та незалежних частин з передаточним числом $i = 30,7$, зібраних в один корпус. Зубчаті колеса – косозубі. Опорами валів служать підшипники кочення.

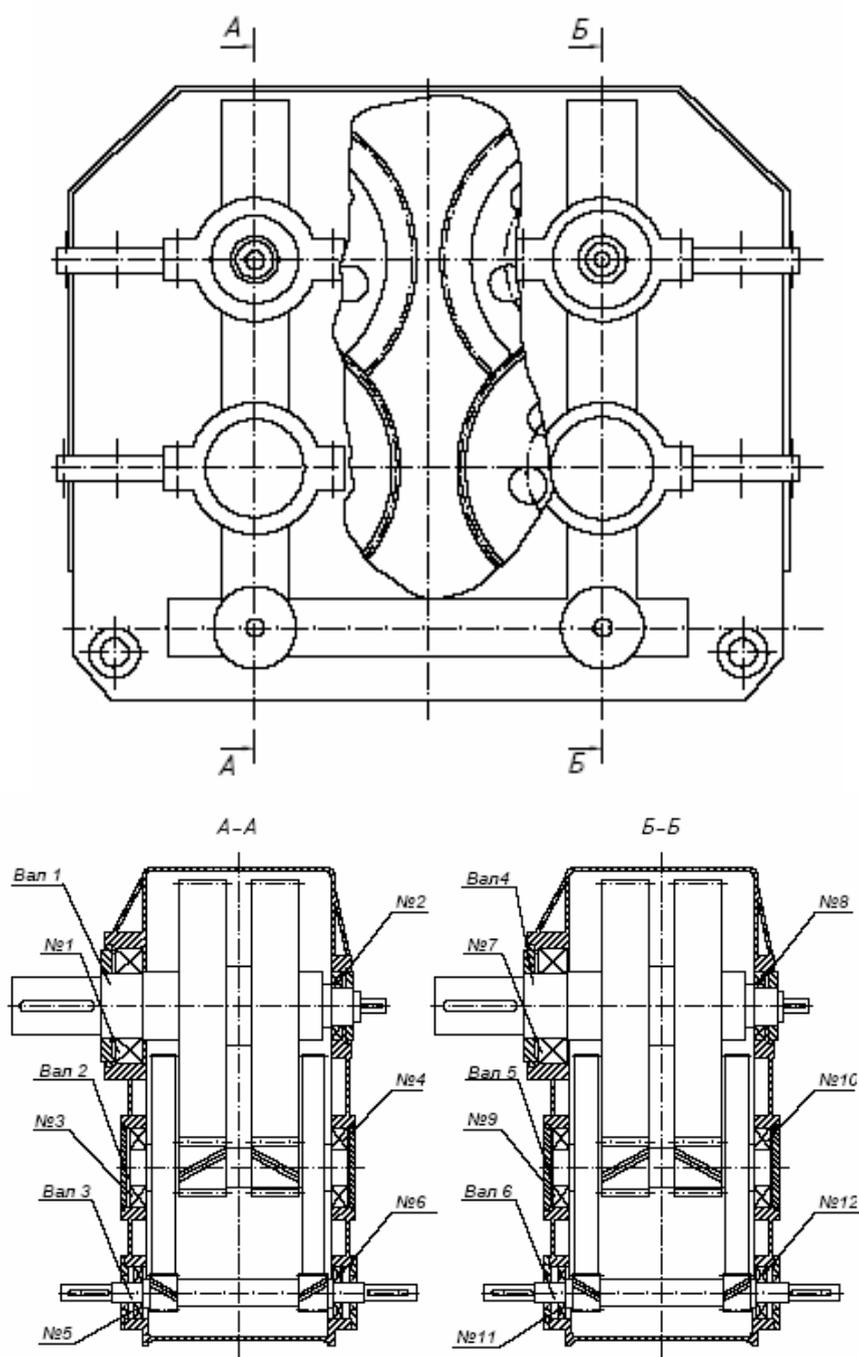
Кожен двигун приводить в дію свій барабан.

Гальмування лебідки здійснюється двохолодочним гальмом, який керується електрогідролічним штовхателем. Гальмовні шківни насаджені на вихідні кінці швидкохідних валів редуктора з сторони, протилежної з'єднанню з двигунами.

Відбір віброакустичних сигналів проводився на підшипнику № 5 валу № 3 (рис. 1) датчиками віброприскорення на основі акселерометра ADXL (виробник Analog Device), частота дискретизації 1кГц, час відбору 5с, що відповідає 5000 відліків. Проведено статистичний аналіз цих сигналів з використанням кореляційної теорії стаціонарних випадкових процесів, та на її основі отримано діагностичні критерії дефектності редуктора крану «Сокіл».

У даній статті наведено результати дослідження горизонтальної складової віброприскорення (надалі сигнал, віброакустичний сигнал та процес). Графік часової залежності сигналу, який надалі досліджується, показаний на рис. 2.

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**



*Рис. 1. Схема редуктора механизма подъому
портального крана «Сокіл»*

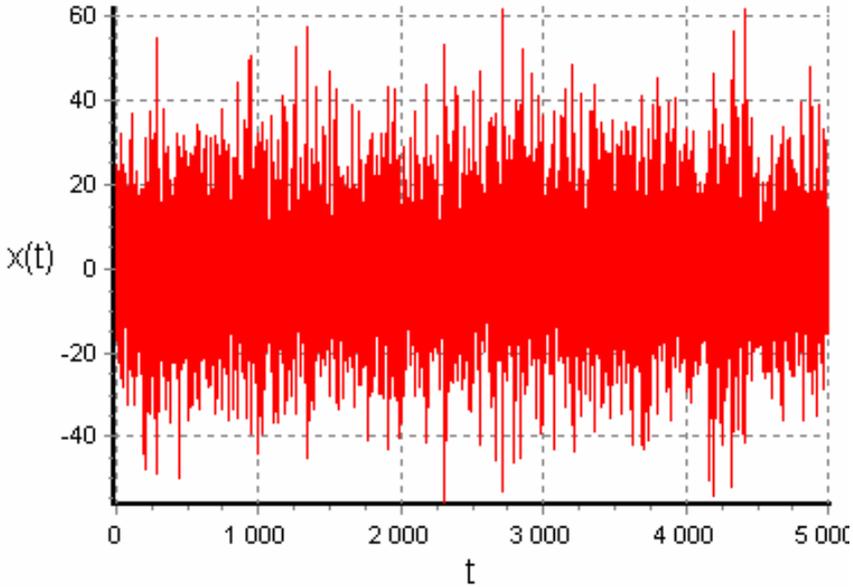


Рис. 2. Часова реалізація віброакустичного сигналу

Для виявлення основних його властивостей на першому етапі аналізу застосуємо методи теорії і статистики стаціонарних випадкових процесів, описуючи їх в рамках теорії другого порядку, тобто в термінах математичного сподівання, кореляційної функції і їх Фур'є перетворень. Якщо $p(x, t)$ і $p(x, y, t_1, t_2)$ одновимірна та двовимірна густини імовірностей сигналу, то співвідношення

$$m = E\xi(t), \quad R(u) = E \overset{0}{\xi}(t) \overset{0}{\xi}(t+u), \quad \overset{0}{\xi}(t) = \xi(t) - m,$$

$$m = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x, t) dt,$$

$$R(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - m)(y - m) p(x, y, t, t+u) dx dy,$$

визначають відповідно його математичне сподівання і кореляційну функцію між значеннями флуктуацій в моменти часу t та $t + u$, де величину u називають зсувом. Кореляційна функція $R(u)$ є функцією парною $R(-u) = R(u)$ і такою, що $R(0) \geq |R(u)|$. Вона належить до класу так званих додатньо визначених функцій, тобто функцій, для яких справедлива нерівність

$$\sum_{i,k=1}^n R(t_i - t_j) \alpha_j \alpha_i^* \geq 0,$$

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

де α_i, α_j – довільні комплексні числа, а знак $*$ – знак спряженості. Остання нерівність приводить до основного співвідношення теорії стаціонарних випадкових процесів – представлення її у вигляді інтегралу

$$R(u) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega u} dF(\omega),$$

відомого як теорема Вінера-Хінчина. При цьому функція $F(\omega)$, що називається спектральною функцією, є неспадною. Якщо накласти додаткову умову, а власне умову абсолютної інтегрованості кореляційної функції

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R(u)| du < \infty,$$

то спектральна функція тоді є диференційованою $\frac{dF(\omega)}{d\omega} = f(\omega)$, і тоді

$$R(u) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega u} f(\omega) d\omega, \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{\omega} f(\omega) d\omega.$$

Зворотнє перетворення має вигляд

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(u) e^{-i\omega u} du$$

і називається спектральною густиною процесу. Ця функція є парною, дійсною та невід'ємною. Оскільки дисперсія $D = R(0)$, яка описує потужність флуктуацій сигналу, рівна

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) d\omega, \text{ то } f(\omega)$$

тракується як спектральна густина потужності сигналу \hat{B} .

Математичне сподівання, кореляційна функція та спектральна густина потужності сигналу за умови його ергодичності можуть бути оцінені на основі єдиної реалізації. Так оцінка математичного сподівання і кореляційної функції мають вигляд

$$\hat{m} = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \xi(t) dt, \quad (1)$$

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**

$$\hat{R}(u) = \frac{1}{\theta} \int_0^{\infty} [\xi(t) - \hat{m}] [\xi(t+u) - \hat{m}] dt. \quad (2)$$

Математичне сподівання оцінки (1) рівне величині, яка оцінюється як $E\hat{m} = m$, тобто ця оцінка є незміщеною. Її дисперсія

$$D(\hat{m}) = E[\hat{m} - E\hat{m}]^2 = \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \left(1 - \frac{|u|}{\theta}\right) R(u) du,$$

прямує до нуля при $\theta \rightarrow \infty$, якщо

$$\lim_{|u| \rightarrow \infty} R(u) = 0. \quad (3)$$

Зміщення оцінки виражає систематичну похибку оцінювання, а величина $\sigma(\hat{m}) = \sqrt{D(\hat{m})}$ – його середньоквадратичну похибку. Виконання граничної нерівності (3) є достатньою умовою ергодичності випадкового процесу по відношенню до його математичного сподівання.

Оцінка кореляційної функції (2) для скінченних довжин реалізації є зміщеною, при цьому зміщення

$$E[\hat{R}(u)] = E\hat{R}(u) - R(u) = -\frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \left(1 - \frac{|u_1|}{\theta}\right) R^2(u + u_1) du_1,$$

при виконанні умови (3) прямує до нуля при $\theta \rightarrow 0$, тобто оцінка є асимптотично незміщеною. Її дисперсія для гаусових сигналів виражається формулою

$$D[\hat{R}(u)] \approx \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \left(1 - \frac{|u|}{\theta}\right) [R^2(u_1) + R(u_1 + u)R(u - u_1)] du_1$$

і, як видно, теж прямує до нуля при умові (3) і $\theta \rightarrow \infty$. При великих зсувах вона приймає значення

$$D[\hat{R}(u)] \approx \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \left(1 - \frac{|u|}{\theta}\right) R^2(u_1) du_1,$$

та при скінченних θ є відмінною від нуля. Якщо кореляційна функція $R(u)$ прямує до нуля з ростом зсуву, очевидно зростатиме відносна

середньоквадратична похибка $\gamma_{\hat{R}} = \frac{\sqrt{D[\hat{R}(u)]}}{R(u)}$. Це приводить до необ-

хідності усічення корелограми, тобто обчислення її значень до певного максимального значення u_{\max} , бо для $|u| \geq u_{\max}$, похибка $\gamma_{\hat{R}}$ прийме не-

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

допустимо великі значення.

Дискретні оцінки математичного сподівання й кореляційної функції будуються на основі заміни інтегралів (1) та (2) відповідними інтегральними сумами

$$\hat{m} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \xi(kh),$$
$$\hat{R}(jh) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} [\xi(kh) - \hat{m}] [\xi((k+j)h) - \hat{m}],$$

при цьому $\theta = Kh$, h – крок дискретизації. Величина кроку дискретизації не змінює принципів властивостей оцінок, однак впливає на точність оцінювання. Її, як правило, вибирають виходячи з того, що похибки дискретного й неперервного оцінювання мало відрізнялися.

Спектральна густина може бути оцінена за допомогою методу Блекмана-Тюкі

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} k(u) \hat{R}(u) e^{-i\omega u} du, \quad (4)$$

тут $k(u)$ – кореляційне вікно, яке задовольняє умови: $k(0) = 1$, $k(-u) = k(u)$, $k(u) = 0$, при $|u| > u_{\max}$, u_{\max} – точка усічення корелограми. Дискретний аналог оцінки (4) має вигляд

$$\hat{f}(\omega) = \frac{h}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} k(nh) \hat{R}(nh) e^{-i\omega nh}.$$

Вірогідність спектральної обробки визначається довжиною реалізації θ , кроком дискретизації h , та точкою усічення корелограми u_{\max} . З ростом u_{\max} збільшується роздільна здатність спектрального аналізу, однак при цьому зростає середньоквадратична похибка оцінювання. Тому вибір точки усічення корелограми слід вибирати з урахуванням цих протилежних тенденцій.

Перетворення Фур'є прямокутного вікна

$$\lambda(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} k(u) e^{-i\omega u} du$$

має найвужчий головний максимум, однак і найвищий рівень бічних пелюсток. При використанні цього вікна спектральна густина потужності гармонічного процесу буде мати схожий вигляд, що зумовлено скачками кореляційного вікна в точках усічення корелограми. Для зменшення цього рівня застосовують вікна, що повільно зникають в інтервалі

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**

$[-u_{\max}, u_{\max}]$. Дуже часто при спектральному аналізі використовують вікно Хемінга

$$k(u) = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{\pi u}{u_{\max}}\right), & |u| \leq u_{\max}; \\ 0, & |u| > u_{\max}; \end{cases}$$

яке є досить селективним [4-6] і має невеликі додатні і від'ємні пелюстки (абсолютні значення екстремумів не перевищують 0,01 основного максимуму). Воно також легко обчислюється. Графіки оцінок кореляційної функції і спектральної густини показані на рис. 3 та рис. 4.

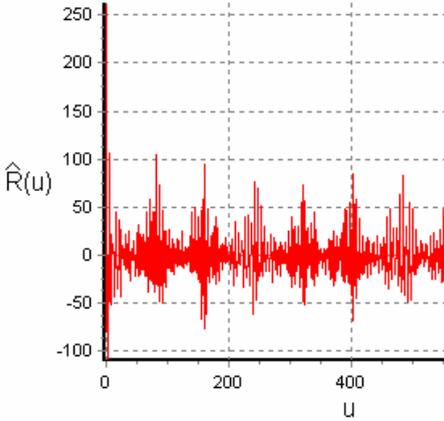


Рис. 3. Оцінка кореляційної функції процесу

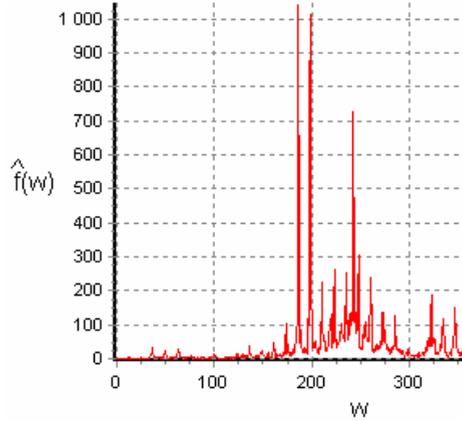


Рис. 4. Оцінка спектральної густини потужності процесу (Вікно Хемінга, $u_{\max} = 900h$)

Зникаюча частина описує властивості флуктуаційної складової, а незникаюча частина – регулярної складової. Виходячи з цього, вібраційний сигнал подамо у вигляді

$$\xi(t) = \eta(t) + g(t), \tag{5}$$

де $\eta(t)$ – випадковий процес, а $g(t)$ – майже періодична функція, яка може бути представлена у вигляді суперпозиції гармонічних коливань з певними частотами

$$g(t) = \sum_{k=1}^L a_k \cos(\omega_k t - \varphi_k). \tag{6}$$

Для оцінки математичного сподівання процесу $\xi(t)$ маємо

$$\begin{aligned} \hat{m}_\xi &= \frac{1}{\theta} \int_0^\theta [\eta(t) + g(t)] dt = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \eta(t) dt + \sum_{k=1}^L a_k \left[\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \cos(\omega_k t - \varphi_k) dt \right] = \\ &= \hat{m}_\eta + \frac{1}{\theta} \sum_{k=1}^L a_k \cos(\varphi_k) \int_0^\theta \cos(\omega_k t) dt + \frac{1}{\theta} \sum_{k=1}^L a_k \sin(\varphi_k) \int_0^\theta \sin(\omega_k t) dt, \end{aligned}$$

де $\hat{m}_\eta = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \eta(t) dt$.

Довжину реалізації θ вибираємо так, щоб

$$\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \cos(\omega_k t) dt \approx 0, \quad \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \sin(\omega_k t) dt \approx 0. \quad (7)$$

Тоді $\hat{m}_\xi = \hat{m}_\eta$, і для оцінки кореляційної функції процесу (5) отримаємо

$$\begin{aligned} \hat{R}(u) &= \frac{1}{\theta} \int_0^\theta [\xi(t) - \hat{m}_\eta][\xi(t+u) - \hat{m}_\eta] dt = \\ &= \frac{1}{\theta} \int_0^\theta [\eta(t) + g(t)] [\eta(t+u) + g(t+u)] dt = \\ &= \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \eta(t)\eta(t+u) dt + \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \eta(t)g(t+u) dt + \\ &\quad \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \eta(t+u)g(t) dt + \frac{1}{\theta} \int_0^\theta g(t)g(t+u) dt. \end{aligned}$$

Друга й третя складові цього виразу є досить малими величинами й ними можна знехтувати, перша складова є оцінкою кореляційної функції процесу $\eta(t)$, а для четвертої маємо

$$\begin{aligned} \hat{R}_g(u) &= \frac{1}{\theta} \int_0^\theta g(t)g(t+u) dt = \\ &= \sum_{i,k=1}^L a_k a_i \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \cos(\omega_i t - \varphi_i) \cos(\omega_k(t+u) - \varphi_k) dt = \\ &= \frac{1}{2\theta} \sum_{i,k=1}^L a_k a_i \int_0^\theta [\cos((\omega_i + \omega_k)t + \omega_k u - (\varphi_i + \varphi_k)) +] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & [+ \cos((\omega_i + \omega_k)t - \omega_k u - (\varphi_i - \varphi_k))] dt = \\
 & = \frac{1}{2\theta} \sum_{i,k=1}^L a_k a_i \int_0^\theta \cos((\omega_i + \omega_k)t - (\varphi_i + \varphi_k)) \cos(\omega_k u) dt + \\
 & + \frac{1}{2\theta} \sum_{i,k=1}^L a_k a_i \int_0^\theta \sin((\omega_i + \omega_k)t - (\varphi_i + \varphi_k)) \sin(\omega_k u) dt + \\
 & + \frac{1}{2\theta} \sum_{i,k=1}^L a_k a_i \int_0^\theta \cos((\omega_i - \omega_k)t - (\varphi_i - \varphi_k)) \cos(\omega_k u) dt + \\
 & + \frac{1}{2\theta} \sum_{i,k=1}^L a_k a_i \int_0^\theta \sin((\omega_i - \omega_k)t - (\varphi_i - \varphi_k)) \sin(\omega_k u) dt.
 \end{aligned}$$

Приймаючи до уваги співвідношення (7), знаходимо

$$\hat{R}_g(u) \approx \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L a_k^2 \cos(\omega_k u).$$

Відтак, оцінка кореляційної функції процесу (5) має вигляд

$$\hat{R}_\xi(u) = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \eta(t) \eta(t+u) dt + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L a_k^2 \cos(\omega_k u) = \hat{R}_\eta(u) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L a_k^2 \cos(\omega_k u).$$

Для оцінки спектральної густини потужності тоді маємо

$$\begin{aligned}
 \hat{f}_\xi(\omega) & = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{R}_\eta(u) k(u) e^{-i\omega u} d\omega + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^L \int_{-\infty}^{\infty} a_k^2 \cos(\omega_k u) k(u) e^{-i\omega u} d\omega = \\
 & = \hat{f}_\eta(\omega) + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^L a_k^2 \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_k u) k(u) e^{-i\omega u} d\omega.
 \end{aligned}$$

При прямокутному вікні $k(u) = 1, u \leq u_{\max}, k(u) = 0, u > u_{\max}$ отримаємо

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_k u) k(u) e^{-i\omega u} d\omega = \frac{1}{2} \int_{-u_{\max}}^{u_{\max}} (e^{i\omega_k u} + e^{-i\omega_k u}) e^{-i\omega u} d\omega = \\
 & = \frac{1}{2} \int_{-u_{\max}}^{u_{\max}} (e^{i(\omega_k - \omega)u} + e^{-i(\omega_k + \omega)u}) d\omega = \frac{1}{2} \int_{-u_{\max}}^{u_{\max}} e^{i(\omega_k - \omega)u} d\omega + \frac{1}{2} \int_{-u_{\max}}^{u_{\max}} e^{-i(\omega_k + \omega)u} d\omega = \\
 & = \frac{1}{4} \left[\frac{\sin(\omega - \omega_k) u_{\max}}{\pi(\omega - \omega_k)} + \frac{\sin(\omega + \omega_k) u_{\max}}{\pi(\omega + \omega_k)} \right].
 \end{aligned}$$

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**

Тобто функція $\hat{f}_\xi(\omega)$ досягає максимальних значень в точках $\omega = \pm\omega_k$, причому

$$\hat{f}_\xi(\omega_k) = \hat{f}_\eta(\omega_k) + \frac{a_k^2}{4} \left(\frac{u_{\max}}{\pi} + \frac{\sin(2\omega_k u_{\max})}{2\pi u_{\max}} \right) + \frac{1}{4} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^L a_n \left[\frac{\sin(\omega_k - \omega_n) u_{\max}}{\pi(\omega_k - \omega_n)} + \frac{\sin(\omega_k + \omega_n) u_{\max}}{\pi(\omega_k + \omega_n)} \right]. \quad (8)$$

З цього виразу видно, що величини максимумів зростають, зі зростанням максимального зсуву u_{\max} – точки усічення корелограмів. Цю властивість спостерігаємо при обробці реальних даних рис. 5. та рис. 6.

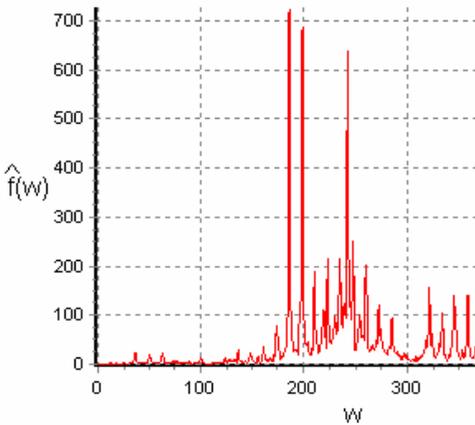


Рис. 5. Оцінка спектральної густини потужності процесу при $u_{\max} = 600h$

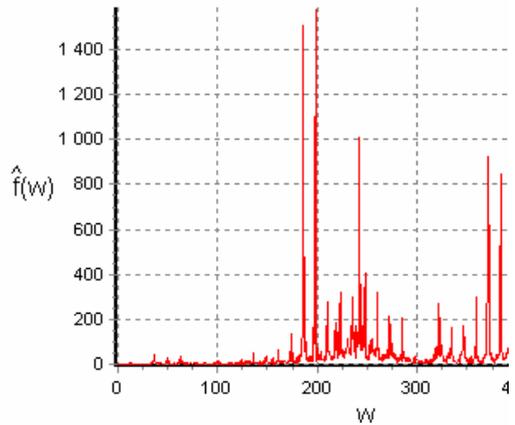


Рис. 6. Оцінка спектральної густини потужності процесу при $u_{\max} = 1200h$

Останнє можна сприймати як доказ того, що незникаючий хвіст корелограмів сигналу зумовлений присутністю в ньому регулярних гармонічних складових. Очевидно, що точки максимумів перетворення Фур'є відрізка цього хвоста $[u_{\max 1}, u_{\max}]$

$$\hat{f}_g(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=L_1}^L \hat{R}_\xi(nh) e^{-i\omega nh}, \quad (9)$$

де $u_{\max 1} = L_1 h$, $u_{\max} = Lh$, може бути використане для визначення частот гармонічних складових. В такий спосіб ми понижуємо зашумленість оцінки спектральної густини, яка пов'язана з випадковою

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**

складовою $\eta(t)$. Оцінка спектральної густини $\hat{f}_g(\omega)$ досліджуваного процесу наведена на рис. 7.

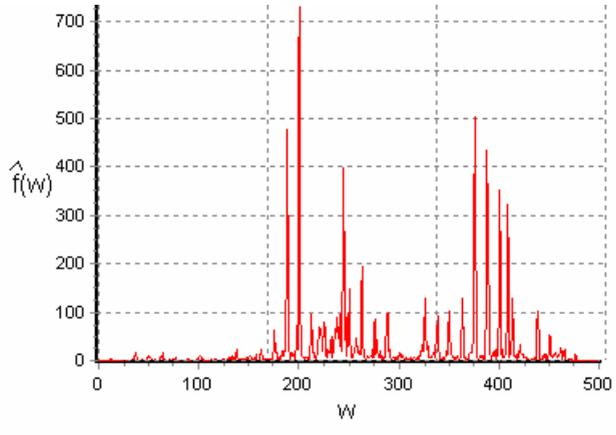


Рис. 7. Оцінка спектральної густини процесу, обчисленого по хвості кореляційної функції,

$$u_{\max 1} = 600h, u_{\max} = 1200h$$

Визначення періоду з використанням незанимаючої частини корелограми може бути здійснене й на основі так званої схеми Бюй-Балло [7]:

$$\hat{R}_g(u, \tau) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \hat{R}_g(u + n\tau), \quad (10)$$

де τ – так званий пробний період. Це перетворення можна записати у вигляді

$$\hat{R}_g(u, T) = \int_{-\infty}^{\infty} h_T(\tau) \hat{R}_g(u - \tau) d\tau,$$

$$\text{де } h_T(\tau) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \delta(\tau + nT).$$

Її частотна характеристика

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h_T(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \sin\left(\frac{2N+1}{2} \omega T\right) \left/ \left[(2N+1) \frac{\sin(\omega T)}{2} \right] \right.,$$

є періодичною функцією частоти з періодом $\frac{2\pi}{T}$ (рис. 8.). Це значить, що за допомогою усереднення (10) з сигналу виділяємо періодичну функцію,

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**

період якої рівний T . Значення її на періоді отримуємо, замінюючи початок відліку u на інтервалі $[u, u + T]$. Очевидно, що найбільший розмах такі періодичні коливання матимуть тоді, коли пробний період T дорівнюватиме величині $T_k = \frac{2\pi}{\omega_k}$. З вищенаведених формул випливає,

що ефективність схеми Бью-Балло покращується, коли збільшується кількість періодів N , що усереднюються. При цьому головні максимуми стають гострішими, а амплітуди бічних пелюсток зменшуються (рис. 9). При $N \rightarrow \infty$ величини цих амплітуд прямують до нуля.

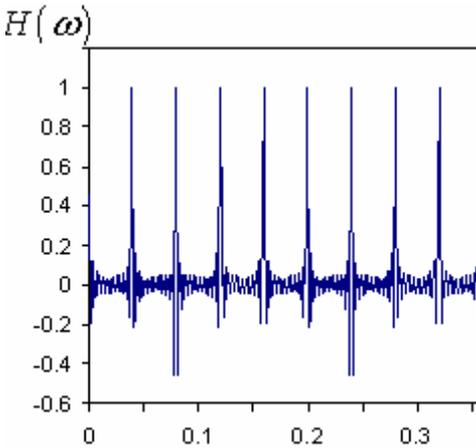


Рис. 8 Частотна характеристика імпульсної функції $h_T(\tau)$, $T=25$ відліків, $N=25$

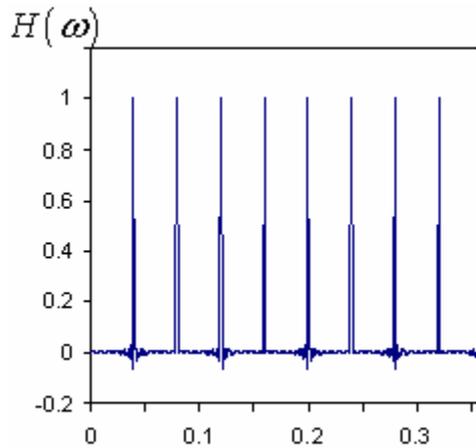


Рис. 9. Частотна характеристика імпульсної функції $h_T(\tau)$, $T=25$ відліків, $N=100$

Результат перетворення (10) залежить від значення змінної u . Як показують дослідження [7; 8], це значення в ніякому разі не повинно відповідати точці перегину функції $\hat{R}_g(u)$, тобто точці, де друга похідна рівна нулю.

Когерентна та компонентна схеми знаходження періоду, що визначаються відповідно співвідношеннями (9)-(10), є досить селективними [7]. Тому є всі підстави застосувати ці схеми безпосередньо до самого сигналу, переписавши їх у вигляді

$$\hat{m}(t, \tau) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \xi(t + n\tau), \quad (11)$$

$$\hat{m}_k(\tau) = \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \xi(t) \left\{ \begin{array}{l} \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right) \\ \sin\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right) \end{array} \right\} dt. \quad (12)$$

Інтервал для пробного періоду, в межах якого здійснюється пошук екстремальних значень функціоналів (11) та (12), визначаються на основі результатів попередніх досліджень, а саме – спектрального аналізу, а також аналізу хвоста періодограми. Слід ще раз підкреслити, що поведінка функціоналу (11), який являє собою усереднення значень вібраційного сигналу, взятих через пробний період τ , залежить від початкового моменту часу t . Найкращий результат отримується тоді, коли t відповідає екстремальним значенням регулярної складової. Оскільки такі значення невідомі, то очевидно, паралельно з пошуком періоду, потрібно проводити й пошук цих моментів часу. Ще однією з вад схеми Бюй-Балло є те, що величини τ можна змінювати дискретно, відповідно до вибраного кроку дискретизації, тоді як при застосуванні перетворення (12) пробний період τ приймає довільні значення. Наведемо приклади визначення періоду обертання валу № 3 за допомогою схеми Бюй-Балло (рис. 10) та компонентною оцінкою (рис. 11). Визначені періоди дорівнюють відповідно $T = 81$ та $T = 80,80$. Вони відповідають частотам 12,35 Гц та 12,37 Гц.

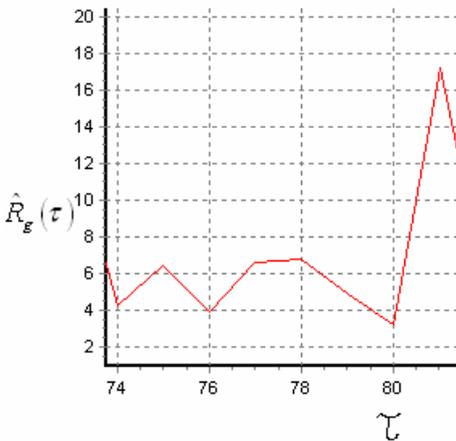


Рис. 10. Схема визначення періоду Бюй-Балло ($T = 81$).

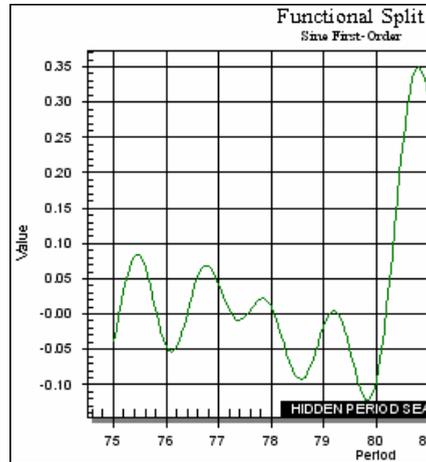


Рис. 11. Компонентна схема знаходження періоду ($T = 80,80$).

На основі екстремумів функціоналів (11) та (12) вібраційного сигналу отримано значення основних частот гармонічних складових наведених у табл. 1.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Таблиця 1

Основні гармонічні складові вібраційного процесу

| Частота, Гц | Інтерпретація |
|--|---|
| 12.4 | Частота обертання валу №3 |
| 36.2 | Частота зубозачеплення шестерень на валах №1 та №2 |
| 49.5 | Четверта гармоніка обертання валу №3 |
| 61.8 | 5-та гармоніка обертання валу №3 |
| 185.6 | Частота зубозачеплення шестерень на валах №2 та №3 |
| 173.2 198 | Частота обертання валу №3 модульована на частоту зубозачеплення шестерень на валах №2 та №3 |
| 371.2 | Подвоєна частота зубозачеплення шестерень на валах №2 та №3 |
| 334.1 346.4 358.8 385.3 395.9 408.3 | Частоти кратні до частоти обертання валу №3, модульовані на подвоєну частоту зубозачеплення шестерень на валах №2 та №3 |
| 403.4 | Частота перекочування комплекту шариків підшипника №5, модульована на 33-тю гармоніку обертання валу №3 |
| 241.5 | Частота перекочування комплекту шариків підшипника №5, модульована на 20-ту гармоніку обертання валу №3 |
| 217.8 | Частота перекочування комплекту шариків підшипника №5, модульована на 18-ту гармоніку обертання валу №3 |

На графіку оцінки спектральної густини потужності вібраційного сигналу присутні піки на частотах, що відповідають модуляціям частоти перекочування комплекту шариків підшипникового вузла № 5 по зовнішньому кільцю модульовану на 33-ю, а також частоти, що відповідають 20-й та 18-й гармонікам обертання вала, що може свідчити про дефектність сепаратора п'ятого підшипника.

Висновки

При дослідженні вібраційних сигналів від редукторів механізмів порталних кранів типу «Альбатрос», «Сокіл», «Кондор» рішення про вібраційний стан необхідно приймати з врахуванням як конструкційних особливостей механізмів, так і вірогідних результатів кореляційного й спектрального аналізу сигналів з використанням методів статистики стаціонарних випадкових процесів, а також методів виявлення так званих

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

прихованих періодичностей, що ґрунтуються на часово-спектральних перетвореннях.

Результати використання перетворення Фур'є кореляційної функції стаціонарного наближення сигналу суттєво залежать від параметрів обробки – довжини реалізації та точки усічення корелограми. Воно спотворює значення амплітуд гармонічних складових сигналу і має недостатньо роздільну здатність. Для отримання більш вірогідних відомостей про амплітудно-частотні характеристики вібраційних сигналів доцільно використовувати так звані компонентні та когерентні функціонали, отримані на основі схеми Бюй-Балло.

Наведена методика виділення сигналів при дослідженні дефектності механізмів може використовуватись для моніторингу технічного стану механізмів порталних кранів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Генкин М.В., Соколова А.Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов.* – М.: Машиностроение. 1987. – 288 с.
2. *Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / А.А. Александров, А.В. Барков, Н.А. Баркова, В.А. Шафранский.* – Л.: Судостроение, 1986. – 276 с.
3. Кей С., Марпл С. *Современные методы спектрального анализа // Тр.ИИР.* – 1988. – 69, №11. – С. 5-51.
4. Марпл С.Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения.* – М.: Мир, 1990. – 584 с.
5. Бендат Дж., Пирсол А. *Измерение и анализ случайных процессов.* – М.: Мир, 1974. – 464 с.
6. Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н. *Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов.* – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 319 с.
7. Яворський І.М., Заболотний О.В., Михайлишин В.Ю. *Оцінка математичного сподівання поліритмічних часових рядів за методом найменших квадратів // Відбір і обробка інформації.* – 2002. – Вип. №17 (93). – С. 20-27.
8. Семенов П.А. *Метод диагностирования механизмов порталных кранов по параметрам вибрации // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць.* – Вип. 20. – Одеса: ОНМУ, 2006. – С.91-96.
9. Семенов П.А. *Методика экспресс-диагностирования крановых редукторов на примере грейферных перегружателей Днепро-Бугского морского порта // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал.* – 2006. – № 3. – С. 72-83.

Надійшла 19.05.08

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В КОРРОЗИОННЫХ СРЕДАХ

Рассмотрен метод граничной интерполяции и установлена возможность его использования для анализа кинетических диаграмм усталостного разрушения сталеблочных металлоконструкций и определения остаточного ресурса металлоконструкции с усталостным повреждением.

Ключевые слова: *крановые металлоконструкции, коррозионное повреждение, дефекты металлоконструкций, метод граничной интерполяции, усталостное разрушение.*

При эксплуатации крановых металлоконструкций имеют место случаи разрушения элементов конструкции по причине спонтанного распространения трещин, которые могут возникать как на стадии изготовления, так и во время работы. С целью исключения случаев проводят регламентный контроль изделия и последующим анализом и расчетом остаточного ресурса металлоконструкции.

Схемы расчета элементов конструкций на прочность и долговечность в рамках механики разрушения может быть разбита на следующие этапы:

- определение формы, размера и местоположения наиболее опасного трещиноподобного дефекта;
- выбор критерия локального разрушения в зависимости от типа материала, конструкции и характера разрушения;
- установление закономерности усталостного (докритического) распространения трещины в рассматриваемом материале;
- определение напряженно-деформированного состояния элемента конструкции ослабленного дефектом заданной конфигурации;
- экспериментальное установление характеристик трещиностойкости заданного материала при внезапном (спонтанном) и усталостном распространении трещины с учетом условий нагружения и среды;
- вычисление критического размера трещины (или критической нагрузки), а также долговечности работы конструкции при нагрузках ниже критической.

Металлоконструкции кранов работают в условиях циклического нагружения. Для проведения расчета необходимо задать тип, configura-

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

цию и размеры исходных дефектов, распределение рабочих напряжений в зоне дефекта, закономерности изменения нагрузки во времени, а также характер и параметры воздействия среды.

Получение информации на этом этапе, основано прежде всего на непосредственном исследовании состояния материала в конструкции с помощью методов неразрушающего контроля. Благодаря непрерывному прогрессу в области создания дефектоскопических средств, связанных с использованием ультразвука, рентгенографии, акустической эмиссии и др., возможности таких исследований постоянно расширяются [1; 2]. Однако большая трудоёмкость и ограниченная чувствительность даже самой современной аппаратуры не дают оснований считать, что при контроле достаточно сложной конструкции удастся выявить абсолютно все дефекты. Поэтому весьма полезен предварительный анализ конструкций, основанный как на сборе и систематизации данных о наиболее распространенных причинах разрушения, исследовании механизмов разрушения. Такой анализ позволяет значительно сузить область, подлежащую обследованию дефектоскопической аппаратурой, и дифференцировать требования к контролю отдельных узлов и элементов.

При расчете необходимо учитывать также возможность существования в конструкции невыявленных, пропущенных при контроле дефектов. Для этого предполагают, что конструкция содержит наиболее опасный тип дефекта – трещину, расположенную самым неблагоприятным образом по отношению к действующим нагрузкам и прочностным свойствам материала, и имеющую размеры, равные нижнему пределу чувствительности применяемого метода контроля. Аналогично задаются параметры предполагаемых дефектов при проведении предварительного проектировочного расчета. Полученные на первом этапе данные составляют основу расчетной схемы, сводящей определение прочности и долговечности конструкций к решению некоторой модельной задачи или нескольких таких задач о предельно-равновесном состоянии и кинетике усталостного развития исходного дефекта в рассматриваемом конструктивном элементе при заданных условиях его нагружения.

Второй этап расчета заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния в окрестности дефекта и определении расчетных параметров, контролирующих это состояние: КИН (коэффициент интенсивности напряжения), раскрытие трещины и др. Такие задачи достаточно сложны в математическом плане и поэтому для практических расчетов обычно используют различные приближенные подходы. Один из них – метод граничной интерполяции, сущность которого в случае однопараметрических задач, характеризующихся одним безразмерным геометрическим параметром ϵ , состоит в следующем [3].

Пусть конфигурация тела (элемента конструкции) характеризуется линейным параметром L , а размер имеющейся в нем трещины – линейным параметром l .

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Представим КИН в вершине трещины в виде

$$K_I = \alpha \sigma_{nom}, \quad (1)$$

где α – геометрическая часть КИН, зависящая от конфигурации тела и трещины;

σ_{nom} – номинальные напряжения в нетто-сечении тела с трещиной.

Рассмотрим частные случаи задачи:

• неограниченное тело с трещиной заданной конфигурации, когда $\varepsilon = l/L \rightarrow 0$, а КИН определяется выражением

$$K_I^0 = \alpha \sigma_{nom}^0; \quad (2)$$

• тело заданной конфигурации с трещиной, размер которой приближается к размеру поперечного сечения тела ($\varepsilon \rightarrow 1$), а величина КИН вычисляется по формуле

$$K_I^1 = \alpha \sigma_{nom}^1. \quad (3)$$

Как правило, частные случаи задачи при $\varepsilon \rightarrow 0$ и $\varepsilon \rightarrow 1$ являются достаточно простыми и допускают точное определение КИН и соответственно параметров $\alpha_0, \sigma_{nom}^{(0)}, \alpha_1, \sigma_{nom}^{(1)}$.

Используя эти решения, значение силовой и геометрической частей КИН для произвольных размеров трещины ($0 \leq \varepsilon < 1$) вычисляем с помощью интерполяционных соотношений

$$\alpha = \frac{\alpha_0 \alpha_1}{\sqrt{\frac{\alpha_0^2}{2} + \frac{\alpha_1^2}{2}}}; \quad (4)$$

$$\sigma_{nom} = \left[\sqrt{\sigma_{nom}^{(0)}} + \sqrt{\sigma_{nom}^{(1)}} - \sqrt{\sigma_{nom}^{(1)}} \varepsilon = 1 \right]^2, \quad (5)$$

которые совместно с (1) определяют решение поставленной задачи.

Метод граничной интерполяции прошел разностороннюю апробацию, его эффективность подтверждена решением многих задач [3], при этом выявлена хорошая корреляция полученных решений с аналогичными результатами, полученными другими методами, в частности методом конечного элемента.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

Наличие в материале различных дефектов обуславливает в отдельных местах при циклическом нагружении развитие магистральных трещин критических размеров, что приводит к разрушению конструкций при напряжениях ниже границы прочности материалов и появление пластических деформаций. Пластически деформированные объёмы тела при повторных нагружениях становятся очагами зарождения усталостных трещин. Как показывают результаты натурных исследований элементов конструкций и экспериментальные исследования усталостного разрушения образцов, усталостная долговечность N , которая определяется количеством циклов до разрушения при заданном нагружении, состоит из числа циклов N_3 до зарождения трещины и числа циклов N_g её докритического распространения, т.е.

$$N = N_3 + N_g . \quad (6)$$

Период зарождения макротрещины N_3 меняется в широких границах (по разным оценкам от 30-90% общей долговечности N) в зависимости от материала, геометрии тела и условий эксплуатации.

Для определения кинетики зарождения усталостной трещины получено дифференциальное уравнение [4]

$$F(\lambda) \left[1 + R^{-2} \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{\partial R}{\partial \alpha} = 1, \quad (7)$$

где R – радиус-вектор контура трещины, которая возникла;
 α – координатный угол полярной системы координат $OR\alpha$ (рис. 1).

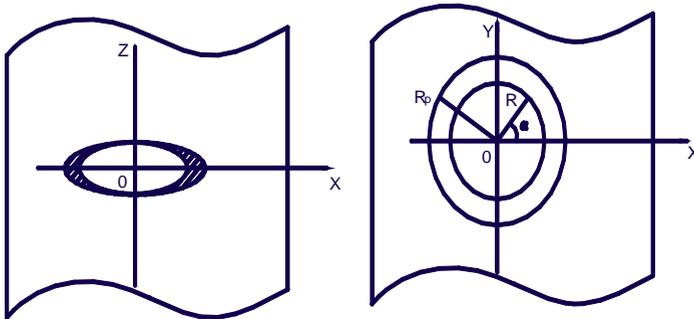


Рис. 1. Схема разреза безграничного тела в координатных плоскостях xOz (а) и xOy (б)

**Подъемно-транспортное оборудование
морских портов**

$$\lambda = 1 - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{fc}}} \quad , \quad (8)$$

где ε_{fc} – деформация растяжения в области предразрушения, при достижении которой происходит спонтанное разрушение тела; $F(\lambda)$ – характеристическая функция усталостного разрушения, которая при заданных условиях (внешняя среда и температура) является характеристикой материала.

Для нахождения периода зарождения N_3 усталостной макротрещины в наиболее общем случае необходимо проинтегрировать уравнение (7), что связано со значительными математическими трудностями. В литературе [4] приводятся результаты для осесимметричных задач механики разрушения когда удалось проинтегрировать уравнение (7). В осесимметричном случае, в частности для пластины с центральной трещиной, уравнение (7) упрощается и принимает вид

$$F(\lambda) \frac{dl}{dN} = 1. \quad (9)$$

Для этого случая период докритического увеличения трещины от l_k до l_0 определяется формулой

$$N_g = \int_{l_0}^{l_k} F(\lambda) dl \quad (10)$$

где λ – функция K_I или δ (раскрытия трещины), которые в свою очередь зависят от l .

Из результатов экспериментальных исследований и логических соображений следует, что функция $F(\lambda)$ является монотонно возрастающей и графически изображается S-подобной кривой (рис. 2) в координатах $F - \lambda$. При этом величина λ_0 отвечает пороговому значению коэффициента $K_I = K_{th}$ (или раскрытию трещины δ_{th}), ниже которого трещина не растет.

Полный диапазон изменения функции $F(\lambda)$ определяется соотношением [4]

$$F(\lambda) = A \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} \right)^m - 1 \right], \quad (11)$$

где
$$\lambda_0 = 1 - \frac{K_{th}}{K_{fc}} = 1 - \left(\frac{\delta_{th}}{\delta_{fc}} \right)^{1/2}; \quad \lambda = 1 - \frac{K_I}{K_{fc}} = 1 - \left(\frac{\delta}{\delta_{fc}} \right)^{1/2}$$

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

При малых значениях λ функции $F(\lambda)$ достаточно точно можно описать полиномом 3-й степени [4]

$$F(\lambda) = \sum_{n=1}^3 A_n \lambda^n. \quad (12)$$

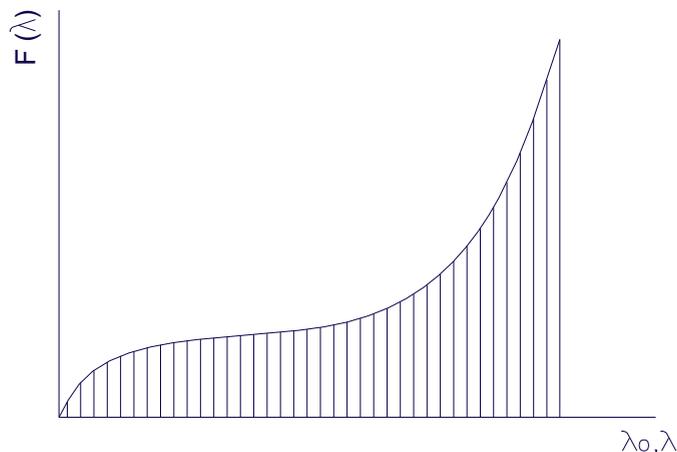


Рис. 2. График изменения характеристической функции $F(\lambda)$

Для определения остаточного ресурса металлоконструкции, т.е. периода докритического роста имеющейся трещины N_g по формуле (10) необходимо определить характеристики материала, которые входят в функцию $F(\lambda)$ (11).

Таковыми характеристиками являются:

K_{th} – пороговое значение КИН цикла, при котором трещина не распространяется на протяжении заданного числа цикла, Н/м 3/2;

K_{fc} – циклическая трещиностойкость, наибольшее значение КИН цикла, при котором наступает долом образца, Н/м 3/2.

Для определения этих характеристик по стандартной методике [5] строили полные кинетические диаграммы циклической трещиностойкости (рис. 3).

При построении кинетических диаграмм, для примера, были выбраны балочные образцы с боковой трещиной и толщиной 10 мм, которая соответствует толщине наиболее часто встречающихся пластинчатых элементов. Материал образцов – сталь St-38-b2, которая используется при изготовлении металлоконструкций порталных кранов, например Альбатрос, Сокол, Кондор, краностроительной фирмы «Kranbau Eberswalde».

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

При построении диаграмм циклической трещиностойкости поддерживали эксплуатационную частоту $f = 2 \text{ Гц}$ и коэффициент асимметрии цикла нагружения $R = 0,7$, который наиболее соответствует характеру нагружения металлоконструкций кранов.

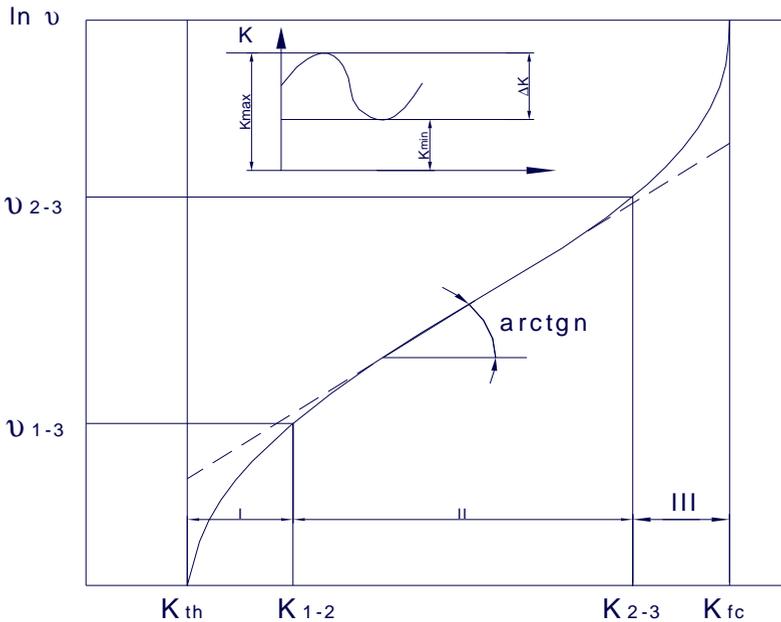


Рис. 3. Кинетическая диаграмма циклической трещиностойкости

Характеристики циклической трещиностойкости были определены на испытательной установке с жестким типом нагружения (рис. 4). Закрепленный в неподвижном захвате последовательно с тензометрическим динамометром 1 балочный образец 2 подвергался циклическому нагружению консольным изгибом. Консольное нагружение образца осуществлялось посредством нагружающего рычага 3, перемещение которому через шатун 4 и тягу задает возбудитель 5 динамических перемещений. Входной вал возбудителя вращается от электродвигателя 6 постоянного тока, что показывает в широких пределах изменять частоту нагружения.

В процессе испытаний амплитуда изгибающего момента регулировалась с помощью возбудителя динамических перемещений. Уровень коэффициента асимметрии цикла нагружения $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = K_{Imin}/K_{Imax}$ измерялся посредством винтового регулятора длины шатуна. Нагрузка регистрировалась электронным потенциометром КСП – 4, сигнал на который поступал с тензодатчиков динамометра. Для питания датчиков использовался стабилизированный источник постоянного тока Б5-7. Динамометр градуировался с помощью специальных приспособлений, размещенных на станине машины. Визуальный контроль за разви-

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

тием трещины (на боковых поверхностях образцов) осуществлялся оптическим микроскопом типа МПБ-2, оборудованным микрометрической системой слежения за вершиной трещины, что обеспечивало возможность измерения её длины с погрешностью 0,01 мм.

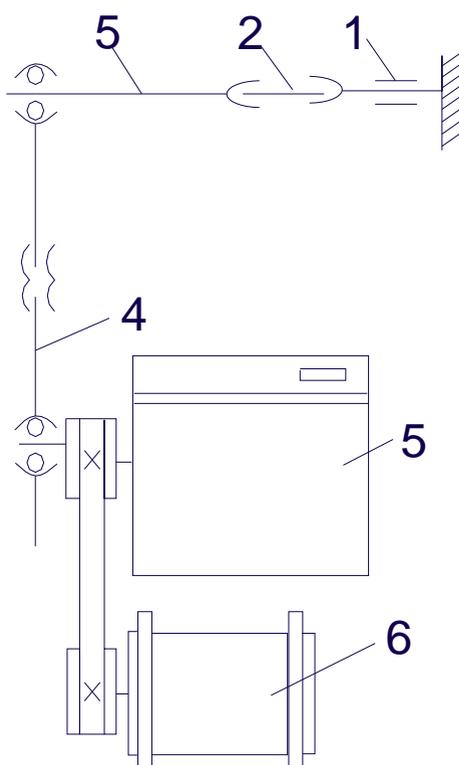


Рис. 4. Схема испытательной установки с постоянной амплитудой перемещения активного захвата для циклической трещиностойкости

Испытания проводились в агрессивной среде: морской воде. При этом использовались рабочие камеры, охватывающие рабочую часть образца с трещиной, не изменяющие его податливости. В результате испытаний стали St-38-b2 на воздухе и в коррозионной среде (морская вода) построены кинетические диаграммы усталостного разрушения (рис. 5). Пороговая трещиностойкость испытываемой стали на воздухе составляет $K_{th} = 4,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а в коррозионной среде $K_{th} = 3,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Воздействие коррозионной среды существенно изменяет кинетику усталостных трещин в низко- и среднеамплитудной областях ΔK_I . На участке низких скоростей продвижения трещины роль коррозионной среды

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

положительна, что отражается в замедлении разрушения порогового размаха КИН.

Интенсификация роста трещин обнаружена в среднеамплитудной области нагружения, в диапазоне $\Delta K I = 7,5 - 9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ускоряющее влияние морской среды максимально и соответствует увеличению скорости разрушения в 2 раза (рис. 5).

В области высокоамплитудного участка кинетической диаграммы усталостного разрушения присутствие среды в вершине трещины практически не сказывается на кинетике трещин.

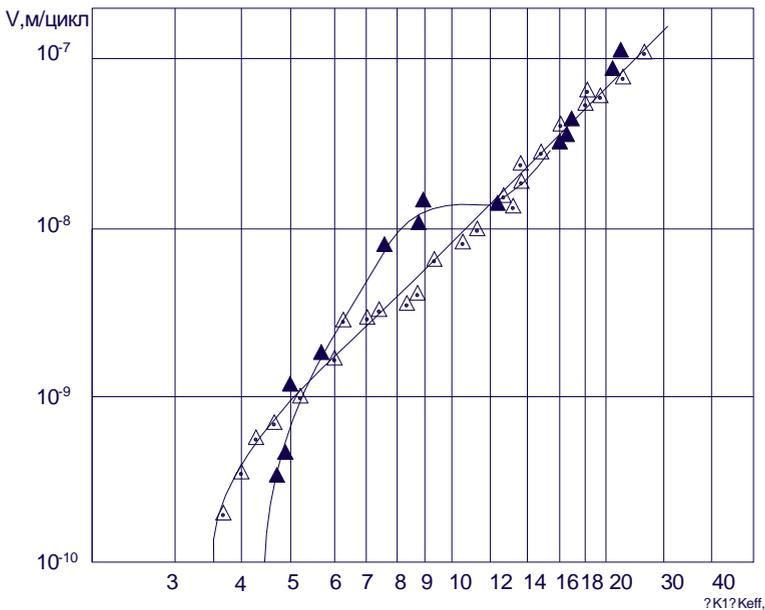


Рис. 5. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали St-38-b2, испытанной в морской воде

Результаты исследований показывают, что метод граничной интерполяции может быть использован для анализа кинетических диаграмм усталостного разрушения сталей крановых металлоконструкций и определения остаточного ресурса металлоконструкции с усталостными повреждениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коллакот Р. Диагностика повреждений. М.: Мир, 1989. – 512 с.
2. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса. М.: Транспорт, 1992. – 256 с.

Подъемно-транспортное оборудование морских портов

3. *Панько І.М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій. – Львів: Вид. центр Львівського НУ ім. Івана Франка, 2000. – 280 с.*
4. *Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982. – 348 с.*
5. *Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. РД50 – 345-82. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 96 с.*
6. *Сакара А.А. К вопросу о нормах дефектности крановых металлоконструкций с коррозионным повреждением // Проблемы техники: Науково-виробничний журнал. – № 3. – Одеса: ОНМУ, 2006. – 64 с.*

Надійшла 20.05.08

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА ЛИНИИ

Сформулирована постановка задачи и разработана экономико-математическая модель, реализация которой позволяет оптимизировать загрузку контейнеровоза на линии.

***Ключевые слова:** линейное судоходство, судоходная компания, линия, контейнеровоз, загрузка судна.*

Одной из основных тенденций в развитии мирового морского судоходства является активный рост контейнеризации. По прогнозам британского консалтингового агентства «Drewry Shipping Consultants» [1], ежегодный рост контейнерооборота в мире до 2012 г. в среднем будет составлять 9,3 %, а в таких регионах, как Дальний Восток, Южная Азия, Африка и Восточная Европа этот показатель будет превышать 10 %.

По итогам 2007 г. контейнеровместимость мирового контейнерного тоннажа составляет 12 097 796 TEU. Его значительная часть находится под контролем 20 ведущих контейнерных операторов (табл. 1) [1].

Таблица 1

*Флот ведущих контейнерных операторов на 1 января 2008 г.
по сравнению с мировым контейнерным флотом*

| Контейнерный флот | Контейнеровместимость | | Количество судов | |
|------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | TEU | доля, % | ед. | доля, % |
| мировой | 12 097 796 | 100 | 5 967 | 100 |
| 20 ведущих операторов | 9 571 864 | 79,12 | 3 086 | 51,72 |
| 30 ведущих операторов | 10 116 418 | 83,62 | 3 459 | 57,97 |

Первое место среди них занимает APM-Maersk, второе – Mediterranean Shg Co (MSC), третье – CMA CGM (табл. 2).

По данным, представленным на 03 мая 2008 г., рейтинг вышеназванных компаний не изменился, однако показатели количественного состава их флота значительно выросли (табл. 3) [1].

Таблица 2

Флот ведущих контейнерных операторов на 1 января 2008 г.

| Рейтинг | Оператор | Всего | | Собственный флот | | Зафрахтованный флот | | Заказанный флот | | Позиция прошлых лет | | |
|---------|---|-----------|-------|------------------|-------|---------------------|-------|-----------------|-------|---------------------|------|------|
| | | TEU | сулов | TEU | сулов | TEU | сулов | TEU | сулов | 2004 | 2005 | 2006 |
| 1 | Maersk Line, Safmarine, APM Saigon Shipping-MSC и Mercosul Line APM-Maersk включает: | 1 874 502 | 524 | 975 054 | 184 | 899 448 | 340 | 469 712 | 92 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | Mediterranean Shg Co (MSC) CMA CGM Group включает: | 1 217 013 | 370 | 691 334 | 212 | 525 679 | 158 | 626 912 | 60 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | CMA CGM, Delmas (with OTAL), ANL, Feeder Associate System, Cagema, MacGreaves и SudCargos | 864 669 | 360 | 267 921 | 87 | 596 748 | 273 | 541 191 | 71 | 5 | 5 | 3 |
| 4 | Evergreen Group включает: Evergreen Marine Corporation, Hatsu Marine и Italia Maritima | 618 458 | 175 | 376 331 | 107 | 242 127 | 68 | 16 537 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| 5 | Hapag-Lloyd Group | 487 283 | 139 | 247 831 | 60 | 239 452 | 79 | 105 000 | 12 | 17 | 15 | 5 |
| 6 | China Shipping Container Lines (CSCL) включает: Shanghai Puhai Shipping Co | 437 183 | 141 | 251 192 | 87 | 185 991 | 54 | 244 782 | 39 | 10 | 17 | 6 |
| 7 | COSCO Container L. | 420 410 | 139 | 222 437 | 93 | 197 973 | 46 | 332 097 | 44 | 9 | 7 | 9 |
| 8 | American President Lines (APL) (контейнерный бизнес Neptune Orient Lines (NOL)) | 400 865 | 122 | 139 690 | 38 | 261 175 | 84 | 263 806 | 41 | 6 | 8 | 7 |
| 9 | NYK включает: Tokyo Seppaku Kaisha (TSK) | 375 949 | 125 | 229 333 | 48 | 146 616 | 77 | 235 755 | 44 | 8 | 9 | 10 |
| 10 | Orient Overseas Container Line (OOCL) | 343 228 | 81 | 195 759 | 34 | 147 469 | 47 | 143 366 | 23 | 16 | 13 | 12 |
| 11 | Hanjin / Senator включает: Senator Line | 333 026 | 81 | 102 581 | 20 | 230 445 | 61 | 221 023 | 35 | 7 | 6 | 8 |

Обеспечение эффективного использования флота

Продолжение табл. 2

| | | | | | | | | | | | | |
|----|--|-----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|------------|----|----|----|
| 12 | Mitsui Ocean Line (MOL) | 332 137 | 108 | 158 688 | 37 | 173 449 | 71 | 190 457 | 35 | 12 | 10 | 11 |
| 13 | Kawasaki Kisen Kaisha Line Ltd (K Line) | 305 247 | 91 | 158 936 | 32 | 146 311 | 59 | 170 564 | 36 | 15 | 12 | 14 |
| 14 | Israel Navigation Co Ltd (Zim) акционер: Gold Star Line и Laurel Navigation | 274 943 | 110 | 133 155 | 41 | 141 788 | 69 | 295 923 | 44 | 13 | 14 | 15 |
| 15 | Hamburg-Süd Group акционер: Hamburg-Süd, Alitalia и FESCO-ANZL | 270 117 | 118 | 108 517 | 36 | 161 600 | 82 | 187 222 | 43 | 20 | 21 | 17 |
| 16 | Yang Ming Line | 268 515 | 81 | 172 825 | 51 | 95 690 | 30 | 153 008 | 24 | 18 | 18 | 16 |
| 17 | CSAV Group акционер: CSAV, CSAV- Norasia, Libra (Brasil), Libra Uruguay | 249 751 | 84 | 21 208 | 4 | 228 543 | 80 | 164 849 | 25 | 16 | 19 | 13 |
| 18 | Hyundai M.M. | 196 782 | 47 | 42 217 | 10 | 154 565 | 37 | 189 346 | 23 | 19 | 19 | 18 |
| 19 | Pacific International Lines (PIL) акционер: Advance Container Line (ACL), Pacific Eagle Line (PEL) и Pacific Direct Line (PDL) | 165 261 | 109 | 101 696 | 72 | 63 565 | 37 | 65 938 | 19 | 21 | 23 | 19 |
| 20 | Wan Hai Lines | 136 525 | 81 | 94 339 | 50 | 42 186 | 31 | 47 714 | 16 | 22 | 25 | 20 |
| 21 | United Arab Shipping Co (UASC) | 95 060 | 38 | 62 884 | 24 | 32 176 | 14 | 89 376 | 16 | - | - | - |
| 22 | MISC Berhad | 82 888 | 28 | 40 151 | 15 | 42 737 | 13 | 6 039 | 1 | - | - | - |
| 23 | IRIS Lines | 73 292 | 64 | 48 964 | 46 | 24 328 | 18 | 87 309 | 31 | - | - | - |
| 24 | Grimaldi (Napoli) акционер: Atlantic Container Line (ACL) и Finlines | 54 120 | 58 | 44 013 | 37 | 10 107 | 21 | 8 784 | 11 | - | - | - |
| 25 | Regional Container Line (RCL) акционер: Siam Peetra | 51 048 | 40 | 40 400 | 33 | 10 648 | 7 | 3 344 | 3 | - | - | - |
| 26 | Sea Consortium | 44 294 | 58 | 0 | 0 | 44 294 | 58 | 0 | 0 | - | - | - |
| 27 | CCNI | 38 745 | 17 | 0 | 0 | 38 745 | 17 | 0 | 0 | - | - | - |
| 28 | Maruba + CLAN | 37 509 | 19 | 569 | 1 | 36 940 | 18 | 2 702 | 1 | - | - | - |
| 29 | Swire Shipping | 34 580 | 33 | 19 094 | 17 | 15 486 | 16 | 0 | 0 | - | - | - |
| 30 | Matson | 33 018 | 18 | 1 418 | 16 | 1 418 | 2 | 0 | 0 | - | - | - |
| | Всего | 10116418 | 3459 | 4978719 | 1492 | 5137699 | 1967 | 4393044 | 793 | - | - | - |

Обеспечение эффективного использования флота

Таблица 3

Флот ведущих контейнерных операторов на 03 мая 2008 г.

| Рейтинг | Оператор | Всего | | Собственный флот | | Зафрахтованный флот | | Заказанный флот | |
|---------|--------------------|-----------------|-------------|------------------|-------------|---------------------|-------------|-----------------|------------|
| | | TEU | судов | TEU | судов | TEU | судов | TEU | судов |
| 1 | APM-Maersk | 2 000 137 | 551 | 1 040 253 | 192 | 959 884 | 359 | 341 921 | 74 |
| 2 | MSC | 1 273 385 | 389 | 721 969 | 216 | 551 416 | 173 | 583 770 | 55 |
| 3 | CMA CGM Group | 904 411 | 382 | 282 257 | 90 | 622 154 | 292 | 643 288 | 76 |
| 4 | Evergreen Line | 627 429 | 178 | 363 425 | 102 | 264 004 | 76 | 108 596 | 10 |
| 5 | Hapag-Lloyd | 507 419 | 140 | 265 331 | 62 | 242 088 | 78 | 122 500 | 14 |
| 6 | COSCO Container L. | 453 074 | 145 | 252 411 | 96 | 200 663 | 49 | 511 432 | 70 |
| 7 | CSCL | 434 039 | 138 | 259 722 | 88 | 174 317 | 50 | 236 879 | 35 |
| 8 | APL | 423 841 | 126 | 139 812 | 38 | 284 029 | 88 | 234 146 | 33 |
| 9 | NYK | 408 224 | 121 | 254 672 | 50 | 153 552 | 71 | 216 690 | 39 |
| 10 | MOL | 373 042 | 117 | 171 846 | 38 | 201 196 | 79 | 202 117 | 36 |
| 11 | Hanjin / Senator | 360 387 | 86 | 126 821 | 24 | 233 566 | 62 | 314 611 | 40 |
| 12 | OOCL | 352 351 | 83 | 204 149 | 36 | 148 202 | 47 | 129 632 | 20 |
| 13 | K Line | 306 994 | 93 | 169 306 | 34 | 137 688 | 59 | 167 248 | 34 |
| 14 | Zim | 284 674 | 112 | 132 658 | 41 | 152 016 | 71 | 299 230 | 43 |
| 15 | Hamburg Süd Group | 280 101 | 116 | 116 214 | 38 | 163 887 | 78 | 189 276 | 38 |
| 16 | Yang Ming Line | 278 533 | 84 | 177 077 | 52 | 101 456 | 32 | 184 432 | 30 |
| 17 | CSAV Group | 275 303 | 92 | 21 208 | 4 | 254 095 | 88 | 146 467 | 20 |
| 18 | Hyundai M.M. | 237 197 | 53 | 87 273 | 16 | 149 924 | 37 | 164 810 | 21 |
| 19 | PIL | 179 116 | 114 | 103 462 | 72 | 75 654 | 42 | 92 047 | 27 |
| 20 | Wan Hai Lines | 144 200 | 84 | 101 237 | 52 | 42 963 | 32 | 54 134 | 20 |
| 21 | UASC | 119 971 | 43 | 84 094 | 28 | 35 877 | 15 | 68 622 | 13 |
| 22 | MISC Berhad | 92 970 | 30 | 40 151 | 15 | 52 819 | 15 | | |
| 23 | IRIS Lines | 80 454 | 60 | 59 478 | 44 | 20 976 | 16 | 73 602 | 27 |
| 24 | RCL | 58 111 | 44 | 38 782 | 32 | 19 329 | 12 | 5 464 | 2 |
| 25 | Grimaldi (Napoli) | 53 182 | 56 | 45 133 | 41 | 8 049 | 15 | 8 784 | 11 |
| 26 | Sea Consortium | 45 787 | 56 | - | - | 45 787 | 56 | - | - |
| 27 | CCNI | 41 107 | 18 | - | - | 41 107 | 18 | - | - |
| 28 | TS Lines | 40 612 | 26 | 4 734 | 3 | 35 878 | 23 | - | - |
| 29 | Maruba + CLAN | 39 020 | 17 | - | - | 39 020 | 17 | - | - |
| 30 | Swire Shipping | 33 484 | 32 | 19 094 | 17 | 14 390 | 15 | - | - |
| | Всего | 10708555 | 3586 | 5282569 | 1521 | 5425986 | 2065 | 5099698 | 788 |

Кроме того, по данным SeaNews [2] компания Neptune Orient Lines (NOL) стала единственной компанией допущенной к новому этапу конкурса по продаже контейнерного бизнеса TUI-Narag-Lloyd. Если сделка состоится [2], то в результате слияния APL (контейнерный бизнес NOL) с Narag-Lloyd будет образован третий по величине контейнерный перевозчик в мире. Таким образом, компания Narag Lloyd занимающая пятое место, и APL, находящаяся на восьмой позиции, в случае слияния вполне могут потеснить CMA CGM.

Эксплуатация контейнерного флота главным образом связана с той частью мирового фрахтового рынка, которая определяется как сфера обращения транспортных услуг, оказываемых судами, работающими в режиме линейного плавания.

Контейнерный флот является перспективным и конкурентоспособным. Его преимущества очевидны:

- высокая сохранность грузов при их транспортировке;
- возможность проведения погрузочно-разгрузочных работ независимо от погодных условий, что обеспечивается за счет использования соответствующих средств укрупнения;
- сокращение числа и высокая производительность грузовых операций, а, следовательно, сокращение стояночного времени транспортного средства и сроков доставки грузов.

Несмотря на это, известные на данный момент исследования, освещающие проблемы контейнерных перевозок, главным образом:

- ориентированы на условия командно-административной системы управления [3-5];
- содержат статистические данные о состоянии и перспективах развития «контейнерного производства» [6];
- носят информационно-описательный характер [7; 8];
- рассматривают глобальные вопросы, например, оптимизацию прибыли контейнерных перевозчиков – участников стратегических альянсов [9].

Решению же локальных производственных задач, связанных с эксплуатацией контейнеровозов, уделяется недостаточно внимания.

Одной из важнейших производственных задач в области организации и управления работой флота является задача формирования загрузки отдельных судов. Её решение требует учёта множества факторов и направлено на эффективное использование ресурсов флота судоходной компании.

В некоторых публикациях [10-17] делались весьма успешные попытки формализовать процесс принятия решений по формированию загрузки судна при различных формах судоходства. При этом, как правило, учитывались особенности, присущие универсальным судам [10-13] и судам типа ро-ро [14-17]. Экономико-математические модели, предложенные в этих работах, надлежащим образом учитывают технико-эксплуатационные характеристики соответствующих типов судов, а также

Обеспечение эффективного использования флота

отражают специфику их эксплуатации. Однако они не могут быть адекватно реализованы применительно к оптимизации загрузки судов других типов, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

Целью данной статьи является повышение эффективности эксплуатации контейнерного флота путём формализации процесса принятия решений по формированию загрузки отдельных судов с учётом их технико-эксплуатационных особенностей и условий работы на линии.

Достижение цели обуславливает необходимость:

- сформулировать постановку задачи формирования загрузки контейнеровоза;
- разработать экономико-математическую модель, реализация которой позволит оптимизировать загрузку контейнеровоза при обслуживании портов линии с учётом:
 - особенностей линейного судоходства;
 - технико-эксплуатационных и конструктивных характеристик судов-контейнеровозов.

Учитывая особенности эксплуатации линейного тоннажа и сложность схемы движения, задачу по оптимизации загрузки контейнеровоза можно сформулировать следующим образом.

Между базовыми портами $O_1, O_2, \dots, O_j, \dots, O_p$ ($j = \overline{1, p} = \overline{1, 2}$) линии, закреплён контейнеровоз, который имеет следующие характеристики:

- расчётную величину грузоподъёмности, соответствующую условиям эксплуатации судна – $Dч$, тонн;
- контейнеровместимость:
 - по количеству TEU (Twenty-Foot Equivalent Unit), т. е. по количеству контейнеров, выраженному в 20-футовом эквиваленте – N ;
 - по количеству 20-футовых контейнеров – N' ;
 - по количеству 40-футовых контейнеров – N'' .

К перевозке между портами рассматриваемой линии предъявлено некоторое количество R партий груза $r = \overline{1, R}$. В свою очередь, каждая грузовая партия r состоит из гружённых или порожних контейнеров типоразмера $i = \overline{1, I_r}$ в количестве n_{ri} . Каждый контейнер размещается в ярусе $s = \overline{1, S_b}$ грузового блока (ячейки) $b = \overline{1, B_k}$, в помещении (в трюме, на палубе) $k = \overline{1, K}$.

Требуется оптимизировать загрузку контейнеровоза, которая максимизирует прибыль от его работы на магистральной линии.

В соответствии с поставленной задачей целевая функция (Z), отражающая соответствующий критерий оптимальности, может быть представлена следующим образом:

Обеспечение эффективного использования флота

$$Z = \sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot (f_{ri} - r_{ri}) \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$(k = 1, K; b = 1, B_k; s = 1, S_b; r = 1, R; i = 1, I_r),$$

где x_{kbsri} – параметр управления, который характеризует количество контейнеров типоразмера i , партии r , размещённых в ярусе s грузового блока b помещения k ;

f_{ri} , r_{ri} – тарифная ставка за перевозку контейнера типоразмера i , партии r и соответственно удельные расходы, связанные с этой перевозкой;

В зависимости от конкретной производственной ситуации целевая функция (Z_1) экономико-математической модели сформулированной задачи может также максимизировать количество контейнеров, принимаемых на борт судна

$$Z_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Оптимизация загрузки судна, прежде всего, направлена на освоение плановых грузопотоков при рациональном использовании производственных возможностей транспортного средства и обеспечении его мореходной безопасности. При решении задачи оптимизации данного технологического процесса все эти требования должны быть учтены в экономико-математической модели путем формирования системы ограничений, формализующих соответствующие условия.

Загрузка судна лимитируется ограничением (3), которое обеспечивает на судне такое количество груза, которое не превышает его чистой грузоподъёмности, соответствующей условиям эксплуатации на заданном направлении

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot q_{ri} \cdot Z_{kbsri} \leq D_q, \quad (3)$$

где q_{ri} – масса контейнера типоразмера i , партии r ;

Z_{kbsri} – параметр, который определяет возможность размещения контейнера типоразмера i , партии r , в ярусе s грузового блока b , в помещении k :

$$Z_{kbsri} = \begin{cases} 1, & \text{если контейнер типоразмера } i, \text{ партии } r \text{ может быть} \\ & \text{размещён в ярусе } s \text{ грузового блока } b \text{ помещения } k; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Обеспечение эффективного использования флота

При погрузке и размещении контейнеров на судне необходимо учитывать предельно допустимые нагрузки на судовые конструкции – палубы и крышки трюмов, а также возможность размещения грузов в том или ином блоке грузового помещения, что обеспечивается неравенством (4)

$$\sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot q_{ri} \cdot Z_{kbsri} \leq D_{kb}, \quad (4)$$

$$(k = \overline{1, K}; b = \overline{1, B_k}),$$

где D_{kb} – допустимая нагрузка на судовые конструкции – палубы и крышки трюмов;

Целостность коносаментной партии учитывается ограничением

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} x_{kbsri} \cdot Z_{kbsri} \leq n_{ri}, \quad (5)$$

$$(r = \overline{1, R}; i = \overline{1, I_r}).$$

Лимитирующим фактором при загрузке судна на линии является его контейнеровместимость, выраженная в 20-футовом эквиваленте. Соблюдение данного условия обеспечивается соотношением (6)

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot k^{TEU} \leq N, \quad (6)$$

где k^{TEU} – коэффициент перевода фактического количества контейнеров в 20-футовый эквивалент [17].

Однако ограничение (6) не учитывает расположение штатных контейнерных мест, а, следовательно, количество 20- и 40-футовых контейнеров, которые могут быть размещены в соответствии с судовой документацией. Для учёта перечисленных факторов в экономико-математическую модель вводятся неравенства (7) и (8).

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot Z'_i \cdot Z_{kbsri} \leq N'; \quad (7)$$

Обеспечение эффективного использования флота

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot Z_i'' \cdot Z_{kbsri} \leq N'', \quad (8)$$

где Z_i' , Z_i'' – параметры, которые определяются следующим образом:

$$Z_i', Z_i'' = \begin{cases} 1, & \text{если грузовое место является 20-футовым и 40-футовым} \\ & \text{контейнером соответственно;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Одним из важных условий работы судов на линии является соблюдение заблаговременно составленного, заранее объявленного и время от времени уточняющегося расписания. В связи с этим время грузовых работ в каждом порту линии не должно превышать периода, предусмотренного линейным расписанием, с учётом установленного резерва стояночного времени, что обеспечивается ограничением (9).

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} 2 \cdot x_{kbsri} \leq T_{nl}^{cm} \cdot K^{cm} \cdot \overline{M\bar{v}}, \quad (9)$$

где T_{nl}^{cm} – стояночное время, предусмотренное линейным расписанием;

K^{cm} – резерв стояночного времени рейса. Практика международного линейного судоходства, как правило, определяет резерв стояночного времени в пределах – 25% ($K^{cm} = 1,25$) от соответствующих показателей, предусмотренных плановым расписанием [18]. Значения этих параметров могут изменяться на усмотрение лица, принимающего решения, в зависимости от конкретных условий эксплуатации судна;

$\overline{M\bar{v}}$ – средневзвешенная норма грузовых работ при обработке контейнеровоза.

Неравенства (10) и (11) позволяют учесть требования устойчивости с точностью достаточной для данного уровня управления. В данной экономико-математической модели также могут быть использованы ограничения, предложенные П.Я. Панариным в работе [10. С. 175].

При этом сформулированная постановка и представленная экономико-математическая модель задачи принципиально не изменятся. Однако трудоемкость подготовки исходных данных значительно повысится, вследствие чего снизится оперативность принятия решений.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot q_{ri} \cdot Z_{kbsri} \leq \frac{1}{3} D_u; \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^{B_k} \sum_{s=1}^{S_b} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{I_r} x_{kbsri} \cdot q_{ri} \cdot Z_{kbsri} \leq \frac{2}{3} D_u. \quad (11)$$

Параметр управления в рассматриваемой задаче представляет собой положительную и физически неделимую величину. В связи с этим в экономико-математическую модель задачи вводятся неравенство (12), отражающее условие неотрицательности переменной, и уравнение (13), обеспечивающее её целочисленность

$$x_{kbsri} \geq 0, \quad (k = \overline{1, K}; b = \overline{1, B_k}; s = \overline{1, S_b}; r = \overline{1, R}; i = \overline{1, I_r}); \quad (12)$$

$$x_{kbsri} = 0, 1, 2, \dots, P, \quad (k = \overline{1, K}; b = \overline{1, B_k}; s = \overline{1, S_b}; r = \overline{1, R}; i = \overline{1, I_r}). \quad (13)$$

Таким образом, в процессе проведенного исследования сформулирована постановка задачи формирования загрузки контейнеровоза и разработана её экономико-математическая модель. Рассмотренная задача является полностью целочисленной, поскольку при её реализации все без исключения переменные должны принимать целые значения. Методы решения данного класса задач основаны на использовании вычислительных возможностей методов целочисленного программирования, широкое применение которых сегодня подкрепляется существованием высокоэффективных компьютерных программ. Они позволяют реализовывать не только методы линейного программирования, но и оптимизационные алгоритмы более сложных типов моделей и задач исследования операций, включая целочисленное, нелинейное и стохастическое программирование.

Рассмотренная в работе задача оптимизации может быть решена с помощью программы «TORA», средства EXCEL Поиск решения, «Пакета экономических расчетов (ПЭР), а также специализированных коммерческих программ «AMPL», «GAMS», «LINGO» и «MPL». Первые три продукта программного обеспечения предназначены для решения задач средних размеров. Для решения же задач оптимизации, содержащих сотни (и даже тысячи) ограничений и переменных, необходимо использовать соответствующие коммерческие программные пакеты, самыми популярными из которых являются «LINGO» и «AMPL».

На этапе решения и оценки адекватности предложенной экономико-математической модели задачи оптимизации контейнеровоза на линии, её реализация проводилась с использованием стандартного программного обеспечения Microsoft Office, а именно с помощью средства EXCEL Поиск решения. Полученные результаты подтвердили адекватность предложенной экономико-математической модели условиям функ-

ционирования реальной системы.

Реализация предложенной экономико-математической модели позволяет:

- получить условно оптимальный при заданных ограничениях проект загрузки контейнеровоза с учётом его технико-эксплуатационных характеристик и особенностей линейного судоходства;
- провести исследования для получения типовых вариантов загрузки контейнеровоза в зависимости от предъявленных к перевозке грузов.

Кроме того, на базе предложенной экономико-математической модели могут быть разработаны модели оптимизации загрузки контейнеровозов для других условий их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.containerships.narod.ru.
2. www.seanews.ru
3. *Контейнерная транспортная система / Под ред. А.Д. Дерибаса. – М.: Транспорт, 1974. – 432 с.*
4. *Клименко К.Н. Контейнерные и пакетные перевозки. – М.: Транспорт, 1978. – 192 с.*
5. *Козлов Ю.Т. Автоматизация управления контейнерными перевозками. – М.: Транспорт, 1984. – 191 с.*
6. *Савельева И.В. Перспективы развития контейнерного производства в Украине // Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. Зб. наук. праць. Вип. 10. – Одеса. ОДМУ, 2001. – С. 113-129.*
7. *Саркисов С.В. Контейнерные перевозки в капиталистических странах. – М.: Транспорт, 1991. – 161 с.*
8. *Снопков В.И. Эксплуатация специализированных судов. – М.: Транспорт, 1987. – 287 с.*
9. *Холоденко А.М., Щербина В.В. Оптимизация прибыли контейнерных перевозчиков – участников глобальных стратегических альянсов // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. Вип. 11. – Одеса: ОНМУ, 2006. – 216 с.*
10. *Панарин П.Я. Организация работы линейного флота: Монография. – М.: Транспорт, 1980. – 192 с.*
11. *Шibaев А.Г. Подготовка и обоснование решений по управлению перевозками и работой флота морской судоходной компании: Монография. – Одесса: ХОРС, 1998. – 208 с.*
12. *Капитанов В.П., Шibaев А.Г., Казарян А.Н. Особенности оптимизации загрузки судна при оперативном управлении работой флота // Экономика и эксплуатация морского транспорта, 1979. – Вып. 15. – С. 51-54.*

13. Шibaев А.Г. Моделирование загрузки судна при линейной форме судоходства // Оптимизация производственных процессов: Сб. научн. тр. – Севастополь: Сев ГТУ, 2001. – Вып. 4. – С. 181-184.
14. Кириллова Е.В. Особенности модели загрузки судна типа ро-ро при линейной форме судоходства // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2002. – Вып. 3. – С. 234-241.
15. Кириллова Е.В. Экспериментальные исследования по оптимизации загрузки судна накатного типа // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2002. – Вып. 4. – С. 233-249.
16. Шibaев А.Г. Кириллова Е.В. Оптимальное размещение грузов на судах типа ро-ро при оперативном управлении работой флота // Нові інформаційні технології навчання в навчальних закладах України: Зб. наук. праць. – Одеса: ОДМУ, 2001. – Вып. 7. – С. 109-114.
17. Кириллова Е.В. Организация и управление работой судов в ролкерной транспортно-технологической системе: Дис. канд. техн. наук: 05.22.01. – Одесса, 2005. – 229 с.
18. Кириллов Ю.И., Кириллова Е.В. Целесообразность освоения контейнерных грузопотоков в факультативных портах линии // Судовождение: Сб. научн. трудов. – Одесса: Издат-Информ, 2007. – Вып. 14. – С. 44-50.

Надійшла 19.05.08

УДК 532.529:518.5

**А. Г. Гирин
Е.О. Минакова**

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПЫЛЕВОЙ ЗАВЕСОЙ

Исследовано воздействие воздушно-пылевой завесы на плоскую ударную волну, возникшую в случае аварийного взрыва в порту. Дифракция ударной волны на завесе рождает вторичную ударную волну и волну разрежения, которые влияют на течение на больших расстояниях. Отмечено сильное влияние плотности и дисперсности аэрозвеси на гасящее действие завесы.

Ключевые слова: *аварийный взрыв, взрывная волна, воздушно-пылевая завеса, гашение.*

Введение

В последние десятилетия большое внимание уделяется вопросам взрывобезопасности различных технологических процессов, в том числе транспортировки и переработки нефти и нефтепродуктов [1]. Выделение большого количества энергии при быстром объёмном сгорании облака, образующегося в результате аварийного выброса горючего, формирует область высокого давления, которая, распадаясь, создает взрывную ударную волну (ВУВ), распространяющуюся с большой скоростью в свободную атмосферу. Импульс и энергия взрыва сосредотачиваются в спутном течении за фронтом волны, представляющем собой скачок всех газодинамических параметров [2]. Именно взрывной импульс разрушает различные сооружения при взаимодействии ударной волны с ними.

Подобные взрывоопасные ситуации могут возникать на территории порта (нефтяного терминала) при перевалке нефтепродуктов. Катастрофические последствия аварийных взрывов [1] заставляют создавать специальные средства гашения ВУВ, заметно снижающие взрывной импульс. Наиболее эффективными из них являются воздушно-водяные (либо пылевые) завесы и пенные экраны [3]. В условиях порта для предотвращения действия взрывных волн на сооружения целесообразно применять завесу, которая может быть создана естественным способом разбрызгивания достаточных объёмов воды путём подрыва заряда, заглублённого в специальные ёмкости [3]. Объём воды выбрасывается с помощью упреждающего подрыва вверх и при своём диспергировании образует завесу – слой, состоящий из взвеси большого количества мелких

© Гирин А.Г., Минакова Е.О., 2008

капель в воздухе. Проникая в завесу, ВУВ теряет часть импульса и энергии на ускорение и нагревание частичек, что снижает её способность к разрушению. По своим физико-механическим свойствам завеса представляет собой двухфазную среду (аэрозоль), характеризующуюся значениями дисперсности (размеров частичек), среднеобъёмных плотностей несущей (воздуха) и дисперсной (частичек) фаз ρ_{10}, ρ_{20} соответственно, при их истинных (материальных) плотностях ρ_1^0, ρ_2^0 , а термодинамические свойства фаз определяются значениями теплоёмкостей c_{v1}, c_2 . В настоящей работе в упрощённой одномерной постановке исследовано воздействие пылевой завесы на плоскую ВУВ, образованную распадом взрывного слоя, находившегося под начальным давлением $p_{взр}$, большим атмосферного p_0 , и найдены величины, характеризующие гасящее действие завесы.

Методика исследования

Определение эффективности гашения представляет собой сложную задачу, которая предполагает не только расчёт многопараметрического гетерогенного течения, но и математическое моделирование внутренних процессов дробления и испарения капель, влияющих на термомеханику, и поэтому предполагает применение методики численного эксперимента. В настоящее время полной математической модели межфазных процессов, происходящих в завесе, и расчётов гашения не существует, поэтому имеет смысл при определённых упрощениях найти приближенные количественные соотношения, дающие возможность определить главные факторы действия завесы на ВУВ, и на этой основе оценить параметры гашения и выбрать оптимальные характеристики завесы. Примем, что несущая фаза представляет собой идеальный газ, а эффекты неидеальности (вязкость, теплопроводность) имеют место только при взаимодействии фаз [4]. Пренебрежём влиянием полидисперсности аэрозоли, а также разрушением частичек, считая их диаметр d неизменным.

Пусть область высокого давления $p_{взр}$, образованная взрывом, занимает слой $0 < x < L_{взр}$, а завеса – $L_{зл} < x < L_{зп}$; при $x = 0$ расчётная область ограничена твёрдой стенкой (рис. 1). В результате распада взрывного слоя образуется ВУВ, которая через некоторый промежуток времени достигает завесы. Требуется найти течение, возникающее в результате их взаимодействия, и величину снижения интенсивности ВУВ как меру гасящего действия завесы.

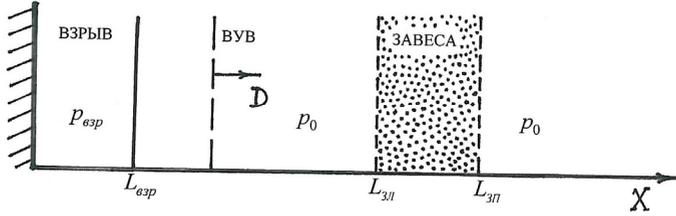


Рис. 1. Постановка задачи

Движение воздуха в областях $0 < x < L_{3Л}(t)$ и $L_{3П}(t) < x$ описывается уравнениями газодинамики [5], а взрывов при $L_{3Л}(t) < x < L_{3П}(t)$ – уравнениями континуальной модели механики двухфазной двухскоростной двухтемпературной смеси с бесстолкновительной монодисперсной фазой твёрдых частичек [4]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 V_1)}{\partial x} &= 0; \\
 \frac{\partial(\rho_1 V_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 V_1^2 + p)}{\partial x} &= F_1 + \frac{3}{2} \alpha_2 \frac{\partial p}{\partial x}; \\
 \frac{\partial(\rho_1 E)}{\partial t} + \frac{\partial((\rho_1 V_1 E + p V_1))}{\partial x} &= -nq - V_2 F_2 + \frac{3}{2} \alpha_2 V_2 \frac{\partial p}{\partial x}; \\
 \frac{\partial(\rho_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 V_2)}{\partial x} &= 0; \\
 \frac{\partial(\rho_2 V_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 V_2^2)}{\partial x} &= F_2 - \frac{3}{2} \alpha_2 \frac{\partial p}{\partial x}; \\
 \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 V_2)}{\partial x} &= nq; \quad F_1 = -F_2 = -(1 - 1,5\alpha_2)nf_\mu.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь ρ, V, u, E, p – плотность, скорость, внутренняя энергия, полная энергия и давление; нижний индекс $i = 1, 2$ относится к несущей и дисперсной фазам; F_i – сила, действующая на i -ю фазу со стороны другой фазы в единице объёма; f_μ – сила трения, действующая на частичку со стороны газа; α_2, n – объёмная концентрация и количество частиц в единице объёма.

Существенная трудность расчёта взаимодействия ВУВ и завесы связана с тем, что течения в области, занятой взрывом, и вне её описываются различными системами уравнений движения, требующими, вообще говоря, применения разных численных схем интегрирования. Кроме того, границы завесы представляют собой особый тип разрыва, т.к.

Обеспечение эффективного использования флота

проницаемы для воздуха, и их выделение в расчёте требует разработки специальных трудоёмких алгоритмов и программных процедур. В настоящей работе произведено выделение основных разрывов – ВУВ и подвижных границ завесы, что дало возможность выполнить на них точно соответствующие граничные условия: на фронте ВУВ – условия Рэнкина – Гюгонно для газовой фазы [5] (параметры дисперсной фазы, не имеющей собственного давления, полагались неизменными при переходе через фронт); на подвижных проницаемых границах завесы – условие совпадения скоростей границы и предельной частички:

$$\dot{L}_3(t) = V_2(L_3(t), t).$$

Расчёты были проведены для трёх вариантов значений параметров завесы:

| | вариант I | вариант II | вариант III |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $R \equiv \rho_{20} / \rho_{10}$ | 1,0 | 2,52 | 1,0 |
| $d, м$ | $6 \cdot 10^{-5}$ | $6 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ |

и при неизменных значениях остальных параметров:

- $\rho_{взр} = 5\rho_0$;
- $\rho_0 = 10^5 \text{ Па}$;
- $\rho_{10} = 1,19 \text{ кг} / \text{м}^3$;
- $\gamma = 1,4$;
- $\rho_2^0 = 2500 \text{ кг} / \text{м}^3$;
- $T_{20} = T_{10} = 293,1 \text{ }^\circ\text{K}$;
- $L_{взр} = 2 \text{ м}$; $L_{3I} = 8 \text{ м}$; $L_{3II} = 11 \text{ м}$.

Для коэффициентов вязкости, теплоёмкости и теплопроводности использованы значения:

- $\mu_1 = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / \text{м} \cdot \text{сек}$;
- $c_{v1} = 716 \text{ м}^2 / \text{сек}^2 \cdot \text{гр}$;
- $c_2 = 710 \text{ м}^2 / \text{сек}^2 \cdot \text{гр}$;
- $\lambda_1 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{сек}^3 \cdot \text{гр}$.

Для силы вязкого межфазного трения f_μ и интенсивности теплообмена q – зависимости [6]:

$$f_\mu = \pi d^2 C_d \rho_1^0 (V_1 - V_2) |V_1 - V_2| / 8, \quad q = \pi d \text{Nu} \lambda_1 (T_1 - T_2), \quad (2)$$

где C_d – коэффициент сопротивления частички;

$Nu = 2 + 0,6Re^{0,5} Pr^{0,33}$, $Re = d\rho_1^0 |V_1 - V_2| / \mu_1$, $Pr = c_{p1}\mu_1 / \lambda_1$ – числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля, T – температура.

Для получения численного решения системы (1) была реализована универсальная схема сквозного счёта Лакса – Вендроффа второго порядка [7], допускающая единообразный счёт как в области, занятой аэрозвесью (уравнения (1)), так и в областях движения воздуха (первые три уравнения (1) при $\alpha_2, n = 0$). Выделение основных разрывов и точное выполнение соотношений на них позволило избавиться от осцилляций решения в их окрестностях, присущих этой схеме.

Взаимодействие ударной волны с завесой

Взаимодействие возмущений с каждым краем завесы рождает отражённое и прошедшее возмущения. Обращённые влево возмущения затем отражаются от центра и вновь взаимодействуют с завесой, а, пройдя через неё, достигают фронта основной ВУВ и изменяют его интенсивность. Таким образом, взаимодействие ВУВ с завесой создает сложную дифракционную волновую картину течения с длительным последствием, исследовать которую аналитическими приближёнными методами невозможно, и даже выделение каждой из волн при численном счёте становится затруднительным.

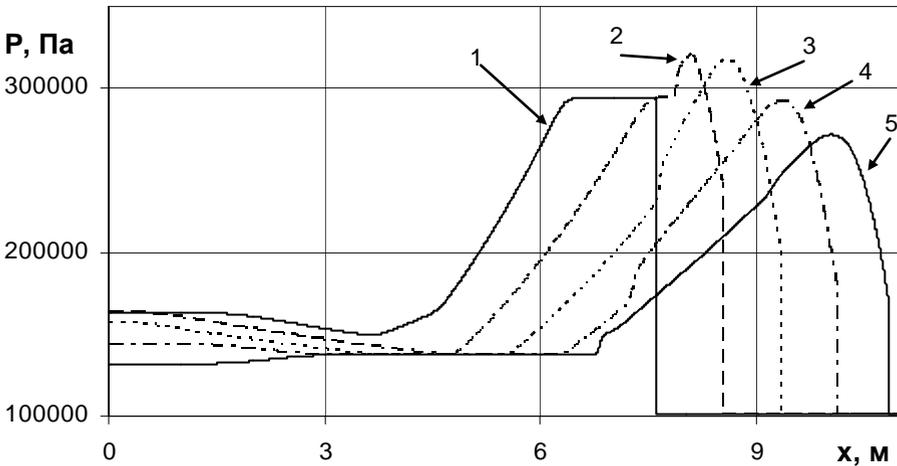


Рис. 2. Профили давления $p(x)$ при взаимодействии ВУВ с левым краем завесы; моменты времени (t , м. сек.): $t = 1 - 10.0$; 2 – 11.0; 3 – 13.0; 4 – 15.0; 5 – 16.0; вариант I

На рис. 2 приведена последовательность распределений давления при прохождении ВУВ через левый край завесы. Спутный за ВУВ поток воздуха испытывает торможение при взаимодействии с частичками, поэтому давление, плотность и температура на фронте ВУВ быстро уменьшаются, а вблизи края завесы растут. Это рождает отраженную от завесы волну сжатия, которая после отражения от центра опрокидывается (градиентная катастрофа [5]), и образует вторичную ударную волну, следующую за основной ВУВ. Интенсивность вторичной волны при больших $R > 1$ достаточно велика, так что при взаимодействии с завесой она, затухая, не исчезает, а выходит из нее в виде скачка (рис. 7), и в значительной степени влияет на динамические характеристики течения на больших расстояниях за завесой, что существенно отличает рассматриваемое течение от взрыва в чистом газе. По своему характеру взаимодействие ВУВ с левым краем завесы такое же, как и в чистом газе при отражении от контактного разрыва [5]: преломлённая волна остаётся ударной, а волна, отражённая от более плотной среды, также является волной сжатия.

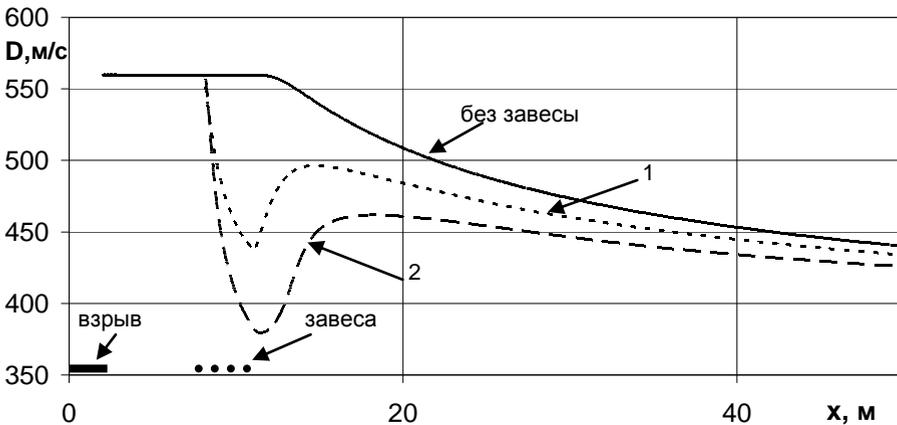


Рис. 3. Влияние плотности аэровзвеси на скорость ВУВ:
1 – вариант 1; 2 – вариант 2; отмечены начальные положения взрывного слоя и завесы

Эта аналогия сохраняется и на правой границе завесы: при переходе в менее плотную среду (окружающий воздух) ВУВ ускоряется, а отражённая внутрь завесы волна противоположна по характеру, являясь волной разрежения. Сравнение графиков зависимости скорости фронта ВУВ $D(x)$, являющейся мерой её интенсивности [5], приведенных на рис. 3 для двух значений плотности завесы, с аналогичным, полученным для случая взрыва в чистом воздухе, показывает, что межфазные трение и теплообмен в завесе существенно снижают интенсивность ВУВ в ближней за завесой зоне. Увеличение скорости фронта ВУВ после ее выхода из завесы вызвано последующим действием градиента давления,

Обеспечение эффективного использования флота

создаваемого торможением несущей фазы при обтекании частичек внутри завесы (см. профили на рис. 2). Дальнейшее снижение скорости фронта, как и в случае взрыва без завесы, вызвано приходом волны разрежения, образованной при начальном распаде взрывного слоя.

Завеса проявляет свойства сжимаемости – её ширина $L_3(t) = L_{3П}(t) - L_{3Л}(t)$ и плотность дисперсной фазы $\rho_2(x, t)$ при прохождении волн изменяются. ВУВ увлекает за собой частички, ускоряя и уплотняя дисперсную фазу, а приход волны разрежения ускоряет их в обратном направлении и уменьшает ρ_2 , что показывает существенно волновой характер движения дисперсной фазы в завесе (рис. 4). Движения границ завесы под действием волн имеют характер затухающих колебаний и подобны движению контактного разрыва при обычном взрыве.

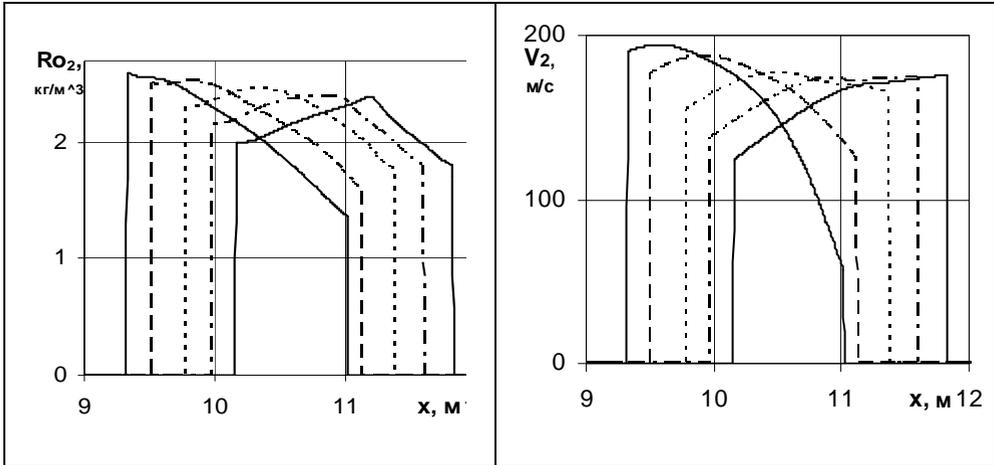


Рис. 4. Последовательности распределений плотности ρ_2 и скорости V_2 дисперсной фазы внутри завесы в различные моменты времени; вариант 1

Следует отметить, что при среднеобъемной плотности дисперсной фазы, превышающей плотность воздуха в несколько раз, $R > 1$, затухание ударной волны внутри завесы происходит интенсивно, так что при увеличении её ширины L_{30} , либо плотности ρ_{20} , либо уменьшении диаметра частичек d скачок на фронте ВУВ может исчезнуть вовсе; ударная волна при этом превращается в дисперсионную волну сжатия без лидирующего скачка [8].

Таким образом, взаимодействие ВУВ с завесой приводит к перераспределению импульса взрыва в ближней зоне за завесой на систему волн, что заметно уменьшает максимальные значения величин на фронте основной ВУВ, определяющие её разрушительное действие.

Взрывная волна вдали от завесы

На больших по сравнению с $L_{3П}$ расстояниях значения параметров на фронте ВУВ мало отличаются от таковых при взрыве без завесы, тем не менее анализ результатов расчёта показал, что дифракционный характер взаимодействия ВУВ с завесой сохраняет влияние на картину течения за ВУВ в течение длительного времени. Перераспределение параметров за фронтом ВУВ, вызванное наличием вторичной ударной волны и следующей за ней волны дополнительного разрежения, имеет место на расстояниях, намного превосходящих $L_{3П}$, что демонстрирует график давления $p(x)$ на рис. 5; аналогичны по характеру распределения скорости и плотности воздуха.

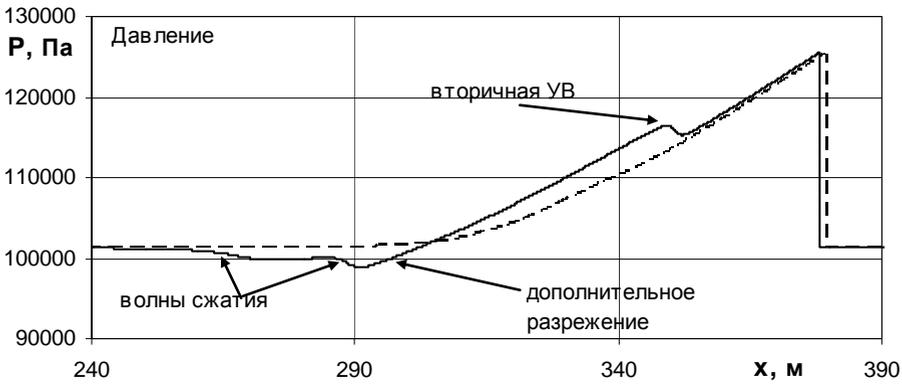


Рис. 5. Влияние вторичной УВ на больших расстояниях от места взрыва; сплошная линия – вариант 1, штриховая – без завесы

Необходимость дополнительного разрежения вызвана тем, что импульс, сообщаемый воздуху вторичной ударной волной, приводит к его перерасширению, при котором давление принимает значения меньшие, чем атмосферное, а это, в силу существования области покоя, прилегающей к центру, требует возвратного течения к центру. Эта конфигурация волн сжатия и разрежения вполне аналогична течению при взрыве в случаях цилиндрической и сферической симметрий [9], где перерасширение газа вызвано радиальной расходимостью линий тока.

Устойчивое распространение дополнительных волн сжатия и разрежения позади основной ВУВ существенно отличает рассмотренное течение от известной одномерной асимптотики плоских взрывных волн в чистом газе, которые на больших расстояниях от места своего возникновения имеют «треугольный» профиль независимо от характера процесса, в результате которого возникла волна [9] и всегда теряют историю процесса своего формирования.

Влияние свойств завесы на характеристики прошедшей волны

Подобным образом гетерогенные свойства завесы, изменяя только численные значения параметров прошедшей сквозь завесу ВУВ, проявляются и при изменении определяющих параметров задачи, среди которых наибольшее влияние оказывают дисперсность d и плотность дисперсной фазы ρ_{20} .

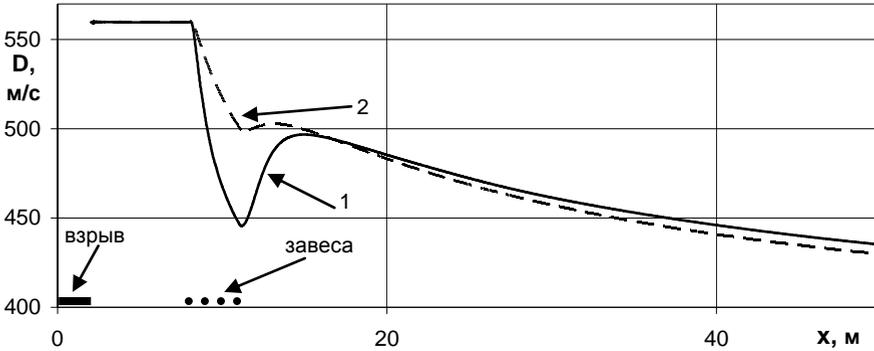


Рис. 6. Скорость фронта при различной дисперсности смеси:
1– вариант 1; 2– вариант 3

Влияние дисперсности аэровзвеси иллюстрируется зависимостями $D(x)$, приведенными на рис. 6 для двух значений d . Мелкодисперсная взвесь влияет на процесс затухания ударной волны сильнее, т.к. при увеличении диаметра частичек и неизменном ρ_{20} уменьшается их количество в единице объема, поэтому сила, действующая в завесе со стороны частичек на несущую фазу, уменьшается: $F_1 \propto n f_\mu \propto \alpha_{20} d^{-1}$. Рост аэродинамической силы из-за увеличения миделевого сечения частичек компенсируется падением за счёт уменьшения их количества в единице объёма. Поэтому, в частности, уменьшение диаметра частичек приводит к большему перераспределению импульса взрыва: в случае мелкодисперсной смеси вторичная УВ имеет большую интенсивность, и вызывает большее дополнительное разрежение. Влияние мелкодисперсной аэровзвеси остаётся более сильным и в ближней за завесой зоне, т.к. кроме большего затухания ВУВ мелкие частички вызывают в завесе больший градиент давления за её фронтом, который при выходе из завесы производит более сильное действие на воздух.

При увеличении среднеобъемной плотности дисперсной фазы ρ_{20} в завесе и неизменной дисперсности ВУВ взаимодействует в завесе с большим количеством частиц, что ведёт к более сильному торможению

воздуха и затуханию фронта волны, которое сказывается на значительных расстояниях за завесой. Однако вторичная УВ напротив, является более сильной (рис. 7) и движется с большей скоростью, т.е. импульс взрыва перераспределяется более плотной завесой в сторону уменьшения максимальных значений на фронте ВУВ. В случае сильноплотной завесы на рис. 7 видно зарождение третьей ударной волны (при $x \approx 6 м$).

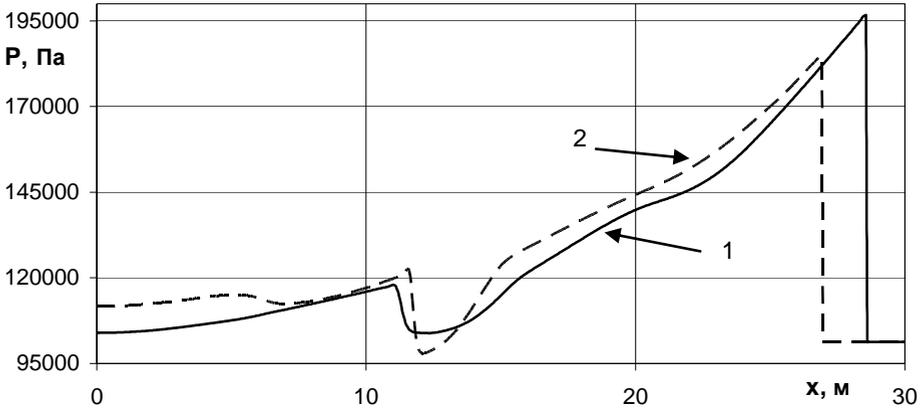


Рис. 7. Влияние плотности аэровзвеси на структуру и интенсивность течения за фронтом ВУВ: распределения $p(x)$ в фиксированный момент времени; 1 – вариант 1, 2 – вариант 2

Заключение

Проведенное в предложенной постановке исследование показало, что взаимодействие взрывной волны с завесой представляет собой сложный волновой процесс, в результате которого взрывной импульс расщепляется, образуя вторичную ударную волну и следующее за ней перерасширение воздуха с возвратным течением к центру, что существенно отличается от поведения взрывной волны в чистом газе. Такое перераспределение импульса взрыва за фронтом основной ВУВ сохраняется на больших расстояниях от места взрыва.

Завеса существенно снижает параметры действия ВУВ в ближней за ней зоне. Гасящим действием завесы можно управлять путём изменения её физико-механических свойств – плотности, дисперсности, заметно влияющих на эффективность гашения.

Необходимо отметить, что численное решение удалось получить благодаря специальным алгоритмам и программным процедурам, разработанным для выделения взрывной волны и границ завесы применительно к универсальной разностной схеме Лакса – Вендроффа. Они позволили устранить осцилляции на сильных разрывах и избежать неустойчивости счета.

Представляет интерес выполнение подобного исследования для случая воздушно-водяной завесы, для которой следует ожидать заметно более сильного воздействия процессов дробления и испарения капель на взрывную волну.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. – М.: Мир, 1986. Кн. 1.– 319 с.; Кн. 2. – 384 с.
2. Физика взрыва // Под ред. К.П. Станюковича.– М.: Наука, 1975. – 704 с.
3. Бузуков А.А. Снижение параметров воздушной ударной волны с помощью воздушно-водяной завесы // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 3. С. 120-130.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1.– М.: Наука, 1987. – 464 с.
5. Гірін О.Г. Газова динаміка // Навч. посібн. Одеса: Астропринт, 2007. – 208 с.
6. Губайдуллин А.А., Ивандаев А.И., Нигматулин Р.И. Некоторые результаты численного исследования нестационарных волн в газовзвесьях // Изв. АН СССР, МЖГ. 1976.– № 5. – С. 64-69.
7. Гірін О.Г. Чисельні методи у газовій динаміці // Навч. посібн. Одеса: Астропринт, 2006. – 168 с.
8. Гирин А.Г. Исчезновение ударной волны в запыленном воздухе // Прикладные задачи математики и механики Матер. XV межд. конф. учёных Украины, Белоруссии, России. Севастополь, 17-21 сент. 2007.– С. 135-137.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

Надійшла 26.05.08

УДК 629.12:621.57

А.А. Вассерман
В.П. Мальчевский

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ВЫБОРА КОМПРЕССОРОВ

Разработана программа для расчета термодинамических циклов одно- и двухступенчатых пароконденсаторных холодильных установок, определения рабочего объема поршневых компрессоров и мощности их электродвигателей. Необходимые данные о термодинамических свойствах хладагентов рассчитываются по уравнениям состояния с помощью автоматизированной информационной системы, созданной авторами ранее. Программа позволяет оперативно оценивать энергетическую эффективность циклов холодильных установок при использовании различных рабочих веществ.

***Ключевые слова:** термодинамические циклы, холодильные установки, поршневые компрессоры.*

Известные международные соглашения предусматривают отказ от использования ряда традиционных хладагентов, разрушающих озоновый слой атмосферы Земли [1], и ограничение эмиссии веществ, усиливающих парниковый эффект [2]. Данные соглашения ратифицированы многими государствами, включая Украину. В связи с этим в последние десятилетия ведутся интенсивные поиски новых хладагентов, удовлетворяющих указанным в [1; 2] условиям. Холодильные установки, использующие такие альтернативные хладагенты, по своей энергетической эффективности должны по меньшей мере не уступать прежним, а желательно превосходить их.

Энергетическая эффективность термодинамических циклов холодильных установок оценивается холодильным коэффициентом, то есть отношением количества теплоты, отведенной от охлаждаемого объекта, к затраченной работе. Для вычисления холодильного коэффициента необходимо определить значения энтальпии хладагента в характерных точках цикла. С этой целью нами разработана программа для расчета циклов современных одно- и двухступенчатых пароконденсаторных судовых и стационарных холодильных установок.

Рассматриваемый термодинамический цикл одноступенчатой холодильной установки с регенеративным теплообменом между жидкостью,

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

выходящей из конденсатора, и паром, поступающим из испарителя в компрессор, представлен на рис. 1а, а её принципиальная схема – на рис. 1 б. Цифрами на схеме обозначены состояния хладагента. Расчёт цикла включает определение термодинамических свойств хладагента в семи характерных точках, удельной массовой и объёмной холодопроизводительности q_0 и q_{0v} , удельной работы $l_{ц}$ и холодильного коэффициента ε .

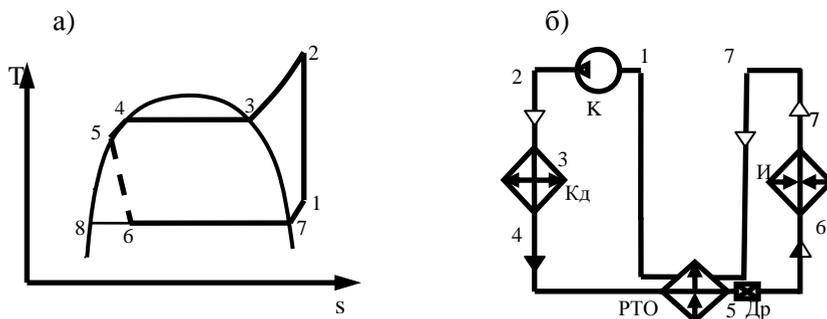


Рис. 1. Цикл и схема одноступенчатой холодильной машины с регенерацией

Свойства хладагентов рассчитываются по уравнениям состояния с помощью автоматизированной информационной системы, разработанной нами ранее [3]. Система позволяет определять свойства ряда чистых веществ, в том числе хладагентов R22, R32, R125, R134a, R143a, R290, R717, R729, R744, а также смесей хладагентов R32/R125, R125/R290, R134a/R290, R23/R744 и R41/R744 при 12 комбинациях независимых переменных.

Программа расчёта циклов — дополнительный блок этой системы. Она предусматривает ввод наименований хладагента (либо смеси), сведений о рассчитываемом цикле и необходимых значений независимых переменных. Далее программа обеспечивает расчёт свойств в характерных точках цикла по уравнениям состояния и использование результатов этих вычислений для расчёта значений q_0 , q_{0v} , $l_{ц}$ и ε . Свойства насыщенного пара и жидкости и влажного пара рассчитываются при задании независимых переменных p , x (в состоянии насыщения $x = 1$ для пара и 0 для жидкости). В однофазной области свойства определяются при задании переменных p , t ; p , h либо p , s .

Исходные данные для расчёта цикла — род хладагента и значения температур его испарения и конденсации. Поскольку хладагентом может оказаться неazeотропная смесь, заданные значения рассматриваются как температуры конца испарения и конденсации, по ним определяются соответствующие значения давления, а затем — температуры начала этих изобарных процессов. В том случае, если разность значений температуры в

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

конец и начале указанных процессов превышает несколько градусов Цельсия, смесь нежелательно использовать в качестве хладагента.

На основании заданного значения температуры конца конденсации рассчитывается температура жидкого хладагента после переохлаждения в регенеративном теплообменнике $t_5 = t_4 - \Delta t$. Значение Δt задаётся в пределах от 5 до 10 °С в зависимости от расстояния, на которое транспортируется жидкий хладагент. По значениям давления конденсации и испарения и параметров точки 5 (t_5 и $p_5 = p_4$) определяются термодинамические свойства хладагента (t , v , h , s) в соответствующих точках: 3, 4, 5, 7 и 8 (рис. 1а).

На завершающем этапе расчёта цикла определяются свойства влажного пара хладагента после дросселирования (в точке 6) по известным аддитивным формулам, для чего предварительно вычисляется степень сухости $x_6 = (h_6 - h_8) / (h_7 - h_8)$ с учётом равенства $h_6 = h_5$. Затем определяются свойства хладагента перед компрессором (в точке 1) при независимых переменных p и h , где $p_1 = p_7$, а h_1 рассчитывается на основании уравнения теплового баланса регенеративного теплообменника $h_1 = h_7 + (h_4 - h_5)$. Далее рассчитываются свойства хладагента после сжатия в компрессоре (в точке 2) при независимых переменных p и s с использованием условий $p_2 = p_3$, $s_2 = s_1$. Наконец, рассчитываются характеристики цикла q_0 , q_{0v} , $l_{ц}$ и ε по формулам

$$q_0 = h_7 - h_6, \quad q_{0v} = q_0 / v_1, \quad |l_{ц}| = h_2 - h_1, \quad \varepsilon = q_0 / |l_{ц}|. \quad (1)$$

Программа предусматривает также вариант расчета цикла одноступенчатой холодильной установки без регенеративного теплообмена, но с переохлаждением жидкости перед дроссельным вентилем и перегревом пара перед компрессором на заданные значения разности температуры Δt . В данном случае переохлаждение возможно благодаря теплообмену жидкого хладагента с водой, охлаждающей конденсатор, и теплопритокам к пару от окружающей среды через изоляцию трубопровода. Этот блок программы позволяет, в частности, рассчитать характеристики цикла для стандартных условий работы установки: температуры испарения -15 °С, температуры конденсации +30 °С и переохлаждения хладагента водой перед дросселированием на 5 °С.

Расчёт компрессора сводится к определению секундного объёма, описываемого поршнями, и потребляемой эффективной мощности. Исходные данные для этого расчёта – холодопроизводительность установки Q_0 , кВт, значения q_0 и $l_{ц}$ (в кДж/кг) и удельный объём пара, всасываемого компрессором, v_1 , м³/кг. На основании этих данных определяются массовый расход хладагента M , кг/с и теоретический объёмный расход V_T , м³/с по формулам

$$M = Q_0 / q_0, \quad V_T = v_1 M. \quad (2)$$

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Затем рассчитывается коэффициент подачи λ_v , учитывающий объёмные потери в компрессоре,

$$\lambda_v = \lambda_c \lambda_{др} \lambda_w \lambda_{пл}, \quad (3)$$

где λ_c – объёмный коэффициент, учитывающий потери от вредного пространства;

$\lambda_{др}$ – коэффициент дросселирования;

λ_w – коэффициент подогрева;

$\lambda_{пл}$ – коэффициент плотности, учитывающий утечки хладагента при сжатии.

Объёмный коэффициент и коэффициент подогрева (для непрямочных компрессоров) рассчитываются по формулам [4]

$$\lambda_c = 1 - c \left(\frac{p_k}{p_u} - 1 \right), \quad (4)$$

$$\lambda_w = \frac{T_u}{T_k + 40}, \quad (5)$$

где $c = 0,02-0,04$ – относительная величина вредного пространства, а индексами «к» и «и» обозначены температуры и давления конденсации и испарения. Значения $\lambda_{др}$ и $\lambda_{пл}$ задаются в пределах 0,96-0,98.

С помощью коэффициента подачи определяется секундный объём, описываемый поршнями компрессора,

$$V_h = V_T / \lambda_v. \quad (6)$$

На основании значения V_d подбирают по каталогам один либо несколько компрессоров, обеспечивающих рассчитанный секундный объём.

В заключение рассчитывается необходимая для работы компрессора теоретическая мощность $N_T = l_c M$, кВт, а затем вычисляется индикаторный к.п.д. компрессора по эмпирической формуле [4]

$$\eta_i = \lambda_w + at_u, \quad (7)$$

где коэффициент a равен 0,002 для аммиачных машин и 0,0025 для фреоновых. Индикаторная мощность компрессора $N_i = N_T / \eta_i$. Эффективная мощность, потребляемая компрессором, равна

$$N_e = N_i + N_{тр}, \quad (8)$$

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

где $N_{тр}$ – мощность, расходуемая на механические потери, – рассчитывается по формуле

$$N_{тр} = p_{тр} V_h. \quad (9)$$

В формуле (9) размерность $N_{тр}$ – кВт, V_h – м³/с, а $p_{тр}$ – кПа; для аммиачных машин $p_{тр} = 60$ кПа, а для фреоновых – 40...50 кПа.

Определив эффективную мощность, следует проверить: обеспечивает ли её электродвигатель выбранного компрессора.

Для оценки реальной энергетической эффективности холодильной установки рассчитывается эффективный холодильный коэффициент

$$\varepsilon_e = Q_0 / N_e. \quad (10)$$

При низких температурах охлаждения либо при высоких температурах конденсации увеличивается отношение давлений конденсации и испарения p_k / p_n , что увеличивает объёмные потери в компрессоре, снижает холодопроизводительность и ухудшает энергетические характеристики установки из-за роста потерь при дросселировании и снятия перегрева. Эти факторы обуславливают переход к двухступенчатому сжатию при $p_k / p_n > 8$. Двухступенчатое сжатие улучшает основные показатели работы холодильной установки, в частности, позволяет применять промежуточное охлаждение пара, сжатого в компрессоре низкого давления. Оно позволяет также ввести двукратное дросселирование с отводом пара, образующегося при первом дросселировании, в компрессор высокого давления.

На практике используются четыре основных схемы двухступенчатых пароконденсаторных холодильных установок, рассмотренные в [4]. Они определяются сочетанием одно- или двукратного дросселирования основного потока с полным либо неполным промежуточным охлаждением хладагента. Разработанная нами программа предусматривает расчёт всех четырёх схем.

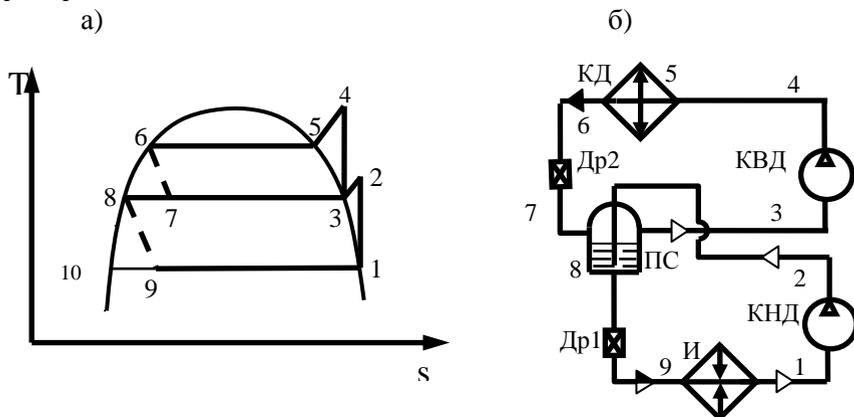
В качестве примера ниже приведен цикл установки с двукратным дросселированием и полным промежуточным охлаждением (рис. 2а) и её принципиальная схема (рис. 2б). Аналогично рис. 1б, цифры на схеме обозначают состояния хладагента. Как и в случае одноступенчатой установки, для расчёта цикла задают род хладагента и значения температур испарения и конденсации. После определения соответствующих значений давления рассчитывается промежуточное давление по формуле

$$p_{пр} = \sqrt{p_n p_k}. \quad (11)$$

По значениям давления p_n , p_k и $p_{пр}$ программа определяет термодинамические свойства хладагента в точках 1, 3, 5, 6, 8, 10, лежащих на линии насыщения. После расчёта значений степени сухости влажного пара $x_7 = (h_7 - h_8) / (h_3 - h_8)$ и $x_9 = (h_9 - h_{10}) / (h_1 - h_{10})$ определяются свойства хладагента в точках 7 и 9 по аддитивным формулам. Затем рассчитываются свойства перегретого пара в конце сжатия в компрессорах низкого и

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

высокого давления (КВД) с использованием условий $p_2 = p_3, s_2 = s_1$
и $p_4 = p_5, s_4 = s_3$.



*Рис. 2. Цикл и схема двухступенчатой холодильной машины
с двукратным дроселированием
и полным промежуточным охлаждением*

Поскольку массовый расход хладагента в ступени ВД больше расхода в ступени НД, соотношение между этими расходами определяется из уравнения теплового баланса промежуточного сосуда

$$M_B (h_3 - h_6) = M_H (h_2 - h_8), \quad (12)$$

откуда

$$M_B = M_H \frac{h_2 - h_8}{h_3 - h_6}, \quad M_H = M_B \frac{h_3 - h_6}{h_2 - h_8}. \quad (13)$$

Таким образом, на 1 кг хладагента, сжимаемого в КВД, приходится $(h_3 - h_6) / (h_2 - h_8)$ кг хладагента, поступающего в испаритель и затем в КНД. С учётом этого обстоятельства характеристики цикла рассматриваемой двухступенчатой установки рассчитываются по формулам

$$q_0 = (h_1 - h_9) \frac{h_3 - h_6}{h_2 - h_8}, |l_u| = (h_2 - h_1) \frac{h_3 - h_6}{h_2 - h_8} + (h_4 - h_3), \quad \varepsilon = \frac{q_0}{|l_u|}. \quad (14)$$

Для расчёта КНД и КВД должна быть задана холодопроизводительность установки Q_0 . Исходя из значения Q_0 , рассчитывается массовый расход хладагента через КНД

$$M_H = \frac{Q_0}{h_1 - h_9}. \quad (15)$$

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Затем по соотношению (13) рассчитывается массовый расход хладагента через КВД. На основании значений расходов хладагента M_n и M_b и его термодинамических свойств в характерных точках цикла программа рассчитывает КНД и КВД по схеме, описанной выше для одноступенчатых установок.

Рассмотрим также цикл и принципиальную схему установки с однократным дросселированием основного потока и неполным промежуточным охлаждением хладагента (рис. 3). Исходные данные в этом случае такие же, как и в предыдущих, промежуточное давление рассчитывается по формуле (11). Особенности данной схемы – глубокое переохлаждение основного потока хладагента в змеевике промежуточного сосуда перед дросселированием и поступление в КВД перегретого пара. Последний образуется в результате смешения насыщенного пара, выходящего из промсосуда, и перегретого пара, нагнетаемого КНД.

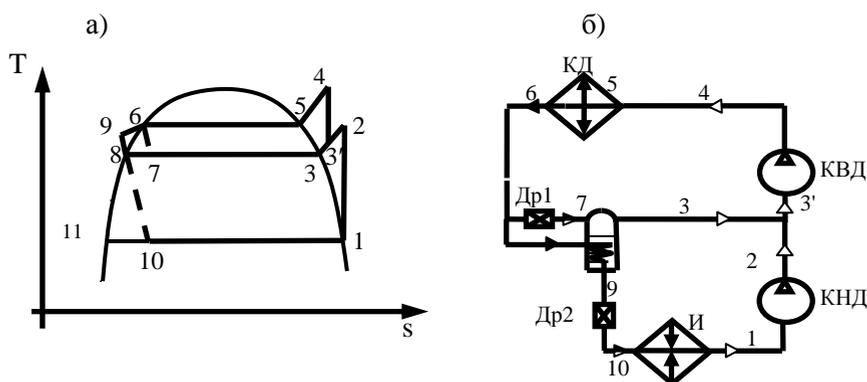


Рис. 3. Цикл и схема двухступенчатой холодильной машины с однократным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением

Термодинамические свойства хладагента в подавляющем большинстве точек (1-3, 5-8, 10, 11) рассчитываются так же, как и в предыдущем случае. Свойства основного потока после переохлаждения (в точке 9) рассчитываются при задании независимых переменных $p_9 = p_k$ и $t_9 = t_8 + (1,0 \dots 1,5)^\circ\text{C}$. Состояние хладагента перед КВД (в точке 3') определяется из условия смешения потоков пара, поступающих из КНД и промежуточного сосуда

$$M_b h_{3'} = M_n h_2 + (M_b - M_n) h_3. \quad (16)$$

Соотношение между массовыми расходами хладагента в ступенях ВД и НД определяется из уравнений материального баланса промсосуда и теплового баланса в змеевике и имеет вид

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

$$M_B = M_H \frac{h_3 - h_9}{h_3 - h_6}. \quad (17)$$

Из уравнений (16) и (17) получается окончательное выражение для расчета значения энтальпии $h_{3'}$, используемое в программе

$$h_{3'} = \frac{(h_3 - h_6)h_2 + (h_6 - h_9)h_3}{h_3 - h_9}. \quad (18)$$

После расчета $h_{3'}$ определяются остальные параметры точки 3', поскольку известно соответствующее значение давления ($p_{\text{пр}}$). Затем рассчитываются термодинамические свойства хладагента после сжатия в КВД (в точке 4) на основании значений независимых переменных ($p_4 = p_k$ и $s_4 = s_{3'}$).

Характеристики цикла установки с однократным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением рассчитываются по формулам

$$q_0 = (h_1 - h_{10}) \frac{h_3 - h_6}{h_3 - h_9}, |l_u| = (h_2 - h_1) \frac{h_3 - h_6}{h_3 - h_9} + (h_4 - h_{3'}), \varepsilon = \frac{q_0}{|l_u|}. \quad (19)$$

Расчет КНД и КВД проводится по такому же алгоритму, как и для установки с двукратным дросселированием, на основании заданного значения холодопроизводительности Q_0 .

По аналогичной методике рассчитываются термодинамические циклы и характеристики компрессоров холодильных установок с двукратным дросселированием и неполным промежуточным охлаждением хладагента и с однократным дросселированием и полным промежуточным охлаждением.

Программа используется для оперативной оценки энергетической эффективности циклов холодильных установок при использовании традиционных и альтернативных хладагентов, в том числе смесей гидрофторуглеродов и природных хладагентов. В качестве примера в табл. 1 приведены рассчитанные значения холодильного коэффициента ε цикла одноступенчатой холодильной установки с регенеративным теплообменом при использовании в качестве хладагента азеотропной смеси R134a/R290, содержащей 0,4 мольной доли R134a, а также компонентов этой смеси и фреона R22. При расчетах принято, что жидкость переохлаждается на 5 °С.

Из табл. 1 видно, что при температурах испарения $-30 \dots -10$ °С и конденсации $25 \dots 40$ °С значения холодильного коэффициента для смеси на 4...13 % меньше, чем для R22. Компоненты смеси имеют весьма близкие значения ε , которые у R134a систематически выше, чем у R290 (на 0,6...1,5 %), и на 5...11 % больше, чем у смеси.

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Таблица 1

Значения холодильного коэффициента цикла одноступенчатой
холодильной установки при работе на различных хладагентах

| $t_{\text{конд}}$, °C | $t_{\text{исп.}}$, °C | | | | | $t_{\text{исп.}}$, °C | | | | |
|---------------------------|------------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|
| | -30 | -25 | -20 | -15 | -10 | -30 | -25 | -20 | -15 | -10 |
| | Для смеси R134a/R290 | | | | | Для R22 | | | | |
| 25 | 3,16 | 3,67 | 4,29 | 5,07 | 6,08 | 3,45 | 3,95 | 4,56 | 5,34 | 6,35 |
| 30 | 2,79 | 3,21 | 3,72 | 4,35 | 5,14 | 3,07 | 3,49 | 4,00 | 4,63 | 5,41 |
| 35 | 2,47 | 2,83 | 3,25 | 3,77 | 4,40 | 2,75 | 3,11 | 3,54 | 4,05 | 4,68 |
| 40 | 2,18 | 2,49 | 2,85 | 3,28 | 3,80 | 2,47 | 2,78 | 3,14 | 3,57 | 4,08 |
| | Для R134a | | | | | Для R290 | | | | |
| 25 | 3,43 | 3,94 | 4,57 | 5,36 | 6,38 | 3,41 | 3,91 | 4,53 | 5,31 | 6,32 |
| 30 | 3,04 | 3,49 | 3,99 | 4,62 | 5,42 | 3,02 | 3,44 | 3,95 | 4,58 | 5,36 |
| 35 | 2,70 | 3,07 | 3,50 | 4,03 | 4,67 | 2,68 | 3,04 | 3,46 | 3,98 | 4,61 |
| 40 | 2,41 | 2,72 | 3,09 | 3,53 | 4,06 | 2,38 | 2,69 | 3,05 | 3,48 | 4,00 |

Программа эффективно используется также в учебном процессе для проведения многовариантных расчетов циклов холодильных установок и для исследования влияния термодинамических свойств хладагентов на характеристики циклов.

ЛИТЕРАТУРА

1. UNEP. *Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer, Final Act: Date – 11 September 1987.* – 6 p.
2. *United Nations on Climate Change. Global Warming General Convention Kyoto, 1997.* – 8 p.
3. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Система для расчёта теплофизических свойств криогенных веществ и альтернативных хладагентов // *Технические газы.* 2007. № 5. С. 57-63.
4. Загоруйко В.А., Голиков А.А. *Судовая холодильная техника.* К.: Наукова думка, 2000. – 607 с.

Надійшла 30.05.08.

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ С ПЛАВНЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ НАГРУЗКИ

На основе статистической обработки экспериментальных данных получено обобщённое уравнение кривой усталости Вейбулла. На основании обобщённых уравнений кривой усталости в форме Вейбулла и в форме показательного уравнений получены зависимости для приближённой оценки предела выносливости по результатам испытаний с плавным увеличением нагрузки.

Ключевые слова: суммирование повреждений, параметры кривой усталости, обобщённая кривая усталости.

Для приближённой расчётно-экспериментальной оценки предела выносливости целесообразно использовать обобщённые уравнения кривых усталости, полученные путём обработки однородного массива экспериментальных данных при сопоставимых условиях проведения эксперимента. Получение обобщённых уравнений с фиксированными параметрами возможно только в тех случаях, когда эти параметры инвариантны к пределу выносливости. Одним из таких уравнений является уравнение Вейбулла.

С целью получения обобщённого уравнения Вейбулла для некоторого массива экспериментальных данных проведём анализ известных зависимостей между параметрами кривой усталости, выраженной этим уравнением, и пределом выносливости.

В работе [1] приведены зависимости параметров m_w и C_w от предела выносливости σ_R в виде

$$m_w = f(\sigma_R) = a_w \cdot \sigma_R + b_w, \quad (1)$$

$$C_w = F(\sigma_R) = \alpha_w \cdot \sigma_R + \beta_w, \quad (2)$$

где a_w , b_w , α_w и β_w – параметры. Для стальных деталей их рекомендуется принимать соответственно равными 0,002; 0,8; 0,005 и 6,6 [1].

При изменении предела выносливости в реальном диапазоне значений (100-500 МПа), параметры m_w и C_w согласно формулам (1) и (2) будут меняться в пределах: $m_w = 1,0-1,8$; $C_w = 7,1-9,1$.

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Чтобы выяснить насколько выборка влияет на диапазон и характер изменения указанных параметров, обратимся к другому массиву экспериментальных данных [2]. Путём обработки этих данных были получены зависимости указанных параметров в таком виде:

$$m_w = f_w(\sigma_R) = \frac{1}{a_{w1}\sigma_R^{0,01} - b_{w1}} = \frac{1}{5,254\sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1, \quad (3)$$

$$C_w = F_w(\sigma_R) = \lg \frac{(\alpha_{w1}\sigma_R + \beta_{w1})^{m_w+1}}{m_w + 1} = \lg \frac{(7,029\sigma_R + 3599)^{m_w+1}}{m_w + 1}, \quad (4)$$

где a_{w1} , b_{w1} , α_{w1} и β_{w1} – параметры.

Согласно этим уравнениям m_w и C_w изменяются в диапазоне значений 1,16-0,81 и 7,51-6,71 соответственно. Заметим, что в первом случае с увеличением предела выносливости параметры m_w и C_w возростали, а во втором наблюдается тенденция обратная. Таким образом, можно констатировать, что характер изменения параметров уравнения Вейбулла обусловлен не только случайной природой процесса усталости, но и случайностью самой выборки.

Для получения обобщённой зависимости между величинами $\lg(\sigma - \sigma_R)$ и $\lg N$ в виде уравнения кривой усталости Вейбулла обратимся к экспериментальным данным испытаний образцов при круговом изгибе, изготовленных из разных марок сталей (табл. 1).

Обобщённое уравнение, полученное путём обработки по методу наименьших квадратов экспериментальных данных, представленных в табл. 1, имеет вид

$$1,25 \lg(\sigma - \sigma_R) + \lg N = 7,67. \quad (5)$$

Основываясь на аналогичном подходе и тех же экспериментальных данных, опуская промежуточные выкладки, запишем обобщённое уравнение кривой усталости, выраженной показательной моделью

$$\frac{\sigma - \sigma_R}{78,01} + \lg N = 6,41. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) позволяют находить величину предела выносливости по результатам испытаний объектов (образцов, моделей, деталей) при стационарной нагрузке.

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

Таблица 1

Результаты испытаний образцов при круговом изгибе

| Номер образца | $\lg(\sigma - \sigma_R)$, МПа | $\lg N$ | № образца | $\lg(\sigma - \sigma_R)$, МПа | $\lg N$ | Номер образца | $\lg(\sigma - \sigma_R)$, МПа | $\lg N$ |
|---|--------------------------------|---------|-----------|--------------------------------|---------|---------------|--------------------------------|---------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Образцы с надрезом, сталь 18Х2Н4ВА ($\sigma_R=200$ МПа) | | | | | | | | |
| 1 | 2,08 | 4,76 | 8 | 1,90 | 5,32 | 15 | 1,60 | 5,91 |
| 2 | 2,08 | 4,89 | 9 | 1,90 | 5,44 | 16 | 1,00 | 5,87 |
| 3 | 2,08 | 4,96 | 10 | 1,90 | 5,48 | 17 | 1,00 | 6,03 |
| 4 | 2,08 | 5,02 | 11 | 1,60 | 5,56 | 18 | 1,00 | 6,28 |
| 5 | 2,08 | 5,04 | 12 | 1,60 | 5,61 | 19 | 1,00 | 6,33 |
| 6 | 1,90 | 5,06 | 13 | 1,60 | 5,71 | 20 | 1,00 | 6,46 |
| 7 | 1,90 | 5,26 | 14 | 1,60 | 5,81 | - | - | - |
| Образцы с надрезом, сталь 18Х2Н4ВА ($\sigma_R=240$ МПа) | | | | | | | | |
| 1 | 2,08 | 4,91 | 8 | 1,90 | 5,33 | 15 | 1,60 | 5,83 |
| 2 | 2,08 | 4,99 | 9 | 1,90 | 5,42 | 16 | 1,00 | 5,86 |
| 3 | 2,08 | 5,05 | 10 | 1,90 | 5,48 | 17 | 1,00 | 6,00 |
| 4 | 2,08 | 5,10 | 11 | 1,60 | 5,45 | 18 | 1,00 | 6,23 |
| 5 | 2,08 | 5,15 | 12 | 1,60 | 5,62 | 19 | 1,00 | 6,33 |
| 6 | 1,90 | 5,19 | 13 | 1,60 | 5,70 | 20 | 1,00 | 6,49 |
| 7 | 1,90 | 5,27 | 14 | 1,60 | 5,73 | - | - | - |
| Образцы без надреза, сталь 18Х2Н4ВА ($\sigma_R=415$ МПа) | | | | | | | | |
| 1 | 2,02 | 5,15 | 8 | 1,81 | 5,68 | 15 | 1,40 | 6,10 |
| 2 | 2,02 | 5,30 | 9 | 1,81 | 5,73 | 16 | 0,70 | 6,03 |
| 3 | 2,02 | 5,32 | 10 | 1,81 | 5,79 | 17 | 0,70 | 6,45 |
| 4 | 2,02 | 5,38 | 11 | 1,40 | 5,83 | 18 | 0,70 | 6,47 |
| 5 | 2,02 | 5,47 | 12 | 1,40 | 5,94 | 19 | 0,70 | 6,54 |
| 6 | 1,81 | 5,46 | 13 | 1,40 | 5,97 | 20 | 0,70 | 6,67 |
| 7 | 1,81 | 5,63 | 14 | 1,40 | 6,00 | - | - | - |
| Образцы без надреза, сталь 18Х2Н4ВА ($\sigma_R=370$ МПа) | | | | | | | | |
| 1 | 2,04 | 4,78 | 8 | 1,85 | 5,53 | 15 | 1,48 | 6,04 |
| 2 | 2,04 | 4,99 | 9 | 1,85 | 5,59 | 16 | 1,00 | 5,88 |
| 3 | 2,04 | 5,08 | 10 | 1,85 | 5,66 | 17 | 1,00 | 6,27 |
| 4 | 2,04 | 5,30 | 11 | 1,48 | 5,71 | 18 | 1,00 | 6,42 |
| 5 | 2,04 | 5,20 | 12 | 1,48 | 5,86 | 19 | 1,00 | 6,47 |
| 6 | 1,85 | 5,24 | 13 | 1,48 | 5,90 | 20 | 1,00 | 6,61 |
| 7 | 1,85 | 5,46 | 14 | 1,48 | 5,93 | - | - | - |
| Образцы с надрезом, сталь 35 ($\sigma_R=190$ МПа) | | | | | | | | |
| 1 | 2,11 | 4,79 | 8 | 1,95 | 5,30 | 15 | 1,60 | 5,91 |
| 2 | 2,11 | 4,91 | 9 | 1,95 | 5,34 | 16 | 1,00 | 5,97 |
| 3 | 2,11 | 4,94 | 10 | 1,95 | 5,42 | 17 | 1,00 | 6,04 |
| 4 | 2,11 | 4,96 | 11 | 1,60 | 5,54 | 18 | 1,00 | 6,15 |
| 5 | 2,11 | 4,99 | 12 | 1,60 | 5,75 | 19 | 1,00 | 6,26 |
| 6 | 1,95 | 5,10 | 13 | 1,60 | 5,68 | 20 | 1,00 | 6,32 |
| 7 | 1,95 | 5,24 | 14 | 1,60 | 5,86 | - | - | - |

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

Продолжение табл. 1

| Образцы с надрезом, сталь 35 ($\sigma_R=240$ МПа) | | | | | | | | |
|---|------|------|----|------|------|----|------|------|
| 1 | 2,08 | 4,87 | 8 | 1,90 | 5,47 | 15 | 1,60 | 5,97 |
| 2 | 2,08 | 4,99 | 9 | 1,90 | 5,53 | 16 | 1,00 | 5,99 |
| 3 | 2,08 | 5,07 | 10 | 1,90 | 5,63 | 17 | 1,00 | 6,28 |
| 4 | 2,08 | 5,14 | 11 | 1,60 | 5,61 | 18 | 1,00 | 6,34 |
| 5 | 2,08 | 5,26 | 12 | 1,60 | 5,79 | 19 | 1,00 | 6,43 |
| 6 | 1,90 | 5,31 | 13 | 1,60 | 5,86 | 20 | 1,00 | 6,58 |
| 7 | 1,90 | 5,43 | 14 | 1,60 | 5,91 | - | - | - |
| Образцы без надреза, сталь 35 ($\sigma_R=280$ МПа) | | | | | | | | |
| 1 | 2,08 | 4,80 | 8 | 1,90 | 5,29 | 15 | 1,60 | 5,89 |
| 2 | 2,08 | 4,84 | 9 | 1,90 | 5,40 | 16 | 1,00 | 6,11 |
| 3 | 2,08 | 4,91 | 10 | 1,90 | 5,47 | 17 | 1,00 | 6,31 |
| 4 | 2,08 | 4,95 | 11 | 1,60 | 5,49 | 18 | 1,00 | 6,39 |
| 5 | 2,08 | 5,00 | 12 | 1,60 | 5,70 | 19 | 1,00 | 6,44 |
| 6 | 1,90 | 5,14 | 13 | 1,60 | 5,77 | 20 | 1,00 | 6,48 |
| 7 | 1,90 | 5,26 | 14 | 1,60 | 5,81 | - | - | - |
| Образцы без надреза, сталь 35 ($\sigma_R=250$ МПа) | | | | | | | | |
| 1 | 2,04 | 5,16 | 8 | 1,85 | 5,54 | 15 | 1,48 | 5,99 |
| 2 | 2,04 | 5,25 | 9 | 1,85 | 5,59 | 16 | 1,00 | 6,01 |
| 3 | 2,04 | 5,28 | 10 | 1,85 | 5,76 | 17 | 1,00 | 6,33 |
| 4 | 2,04 | 5,37 | 11 | 1,48 | 5,62 | 18 | 1,00 | 6,49 |
| 5 | 2,04 | 5,47 | 12 | 1,48 | 5,79 | 19 | 1,00 | 6,56 |
| 6 | 1,85 | 5,41 | 13 | 1,48 | 5,87 | 20 | 1,00 | 6,67 |
| 7 | 1,85 | 5,47 | 14 | 1,48 | 5,90 | - | - | - |

Для расширения возможностей этих зависимостей и применения их в случае нестационарного нагружения (например, для случая линейного непрерывного увеличения нагрузки) запишем известное выражение для линейного суммирования усталостных повреждений

$$\int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = \int_{\sigma_1}^{\sigma_p} \frac{d(\sigma - \sigma_R)}{\alpha \cdot N} = a, \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{d(\sigma - \sigma_R)}{dN}$ – скорость увеличения напряжения;

σ_1 – начальное напряжение;

n_c – суммарное число циклов до разрушения;

σ_p – напряжение при котором произошло разрушение;

a – сумма накопленных повреждений.

Выразим долговечность до разрушения N из уравнения Вейбулла и показательного уравнения

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

$$N = \frac{10^{C_w}}{(\sigma - \sigma_R)^{m_w}}, \quad (8)$$

$$N = \frac{10^{C_{II}}}{10^{(\sigma - \sigma_R)/K}}. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (7) и (8) позволяет получить зависимость

$$(\sigma_P - \sigma_R)^{m_w+1} - (\sigma_P - \sigma_R)^{m_w+1} = a \cdot \alpha (m_w + 1) \cdot 10^{C_w}. \quad (10)$$

По аналогии запишем зависимость для показательного уравнения кривой усталости, решая совместно уравнения (7) и (9)

$$\sigma_P - \sigma_R = K \lg \left(10^{\frac{\sigma_1 - \sigma_R}{K}} + \frac{a \cdot \alpha \cdot 10^{C_{II}} \ln 10}{K} \right). \quad (11)$$

В случае, когда $\sigma_1 = \sigma_R$ и $a=1$, зависимости (10) и (11) можно упростить и представить в виде

$$\sigma_R = \sigma_P - \left[\alpha \cdot 10^{C_w} (m_w + 1) \right]^{\frac{1}{m_w+1}}, \quad (12)$$

$$\sigma_R = \sigma_P - K \lg \left(1 + \frac{\alpha \cdot 10^{C_{II}} \ln 10}{K} \right). \quad (13)$$

Подставляя значения $m_w = 1,25$; $C_w = 7,67$; $K = 78,01$ МПа и $C_{II} = 6,41$ из формул (5) и (6) в выражения (12) и (13), получаем

$$\sigma_R = \sigma_P - \left[\alpha \cdot 10^{7,67} (1,25 + 1) \right]^{\frac{1}{1,25+1}} = \sigma_P - 3387 \alpha^{0,44}, \quad (14)$$

$$\sigma_R = \sigma_P - 78,01 \cdot \lg \left(1 + \frac{\alpha \cdot 10^{6,41} \ln 10}{78,01} \right) = \sigma_P - 78,01 \cdot \lg(1 + 75869\alpha). \quad (15)$$

Для экспериментальной проверки полученных решений обратимся к результатам испытаний лабораторных образцов при двух скоростях увеличения напряжений [3]. Рассчитаем значения пределов выносливости по зависимостям (14) и (15) и определим их погрешность относительно значения предела выносливости, найденного по результатам испытаний 20 образцов по методу «вверх – вниз» (материал – сталь 45,

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

$\sigma_R = 145$ МПа). Результаты эксперимента и расчёта приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов при плавно увеличиваемой нагрузке

| Номер обр. | α , Па/цикл. | σ_P , МПа | σ_R , МПа | | Погрешность δ_{σ_R} , % | |
|---------------|------------------------|---------------------|------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|
| | | | формула (14) | формула (15) | формула (14) | формула (15) |
| 1 | 100 | 197,9 | 139,0 | 125,0 | -4,1 | -13,8 |
| 2 | | 206,1 | 147,2 | 133,3 | -1,5 | -8,1 |
| 3 | | 210,3 | 151,4 | 137,5 | 4,4 | -5,2 |
| 4 | | 210,9 | 152,0 | 138,1 | 4,8 | -4,8 |
| 5 | 200 | 221,6 | 141,8 | 127,3 | -2,2 | -12,2 |
| 6 | | 223,7 | 143,9 | 129,4 | -0,8 | -10,8 |
| 7 | | 229,5 | 149,7 | 135,2 | 3,2 | -6,8 |
| 8 | | 232,4 | 152,6 | 138,1 | 5,2 | -4,8 |

Погрешности определения предела выносливости, как видно из табл. 2, в целом находятся в допустимых пределах. Следует лишь заметить, что при использовании зависимости (14) погрешности оказались меньше и, кроме того, они различны по знаку. Данный факт свидетельствует о том, что выбор уравнения кривой усталости заметно влияет на оценку предела выносливости и это необходимо учитывать при обработке экспериментальных данных, в первую очередь, когда эти данные получены при нестационарном режиме нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Олійник М.В. Конструкційна міцність і відновлення деталей. – Одеса: Аудиторія, 2000. – 190 с.
2. Коноплёв А.В. Обобщённое показательное уравнение кривой усталости // Проблемы техники: научно-производственный журнал. – 2008. – № 1. С.32-39.
3. Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Кобаков А.Г. Методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости в практических приложениях: Монография. – Одесса: Астропринт, 2000. – 140 с.

Надійшла 27.05.08

УДК 532.543

А.В.Малахов
И.В.Ткаченко
Ю.В. Рудь

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ

В работе рассмотрены основные физические особенности процесса сепарации судовых льяльных вод. Приведены основные соотношения, описывающие такой процесс. Выполнен анализ существующих методов сепарации. Дано описание нового гидродинамического метода выделения из судовых льяльных вод нефтесодержащих компонент при помощи процесса суперкавитации.

***Ключевые слова:** сепарация, кавитационная камера, судовые льяльные воды, стратификация.*

В настоящее время при эксплуатации судов возникает проблема возникновения, сбора, хранения и последующей переработки сточных технологических вод. Сепарация таких вод, в состав которых в основном входят продукты нефтехимии является одной из самых актуальных. Данная проблематика напрямую связана с использованием природных ресурсов и контролем за состоянием экологии в планетарном масштабе. Вопросы регенерации отработанных продуктов нефтехимии помимо экологического эффекта приобретают важный экономический аспект.

Технология очистки судовых льяльных вод (СЛВ) напрямую определяется требованием к величине выходной концентрации нефтепродуктов. В зависимости от этого параметра используются различные принципы очистки. В ходе выполненного анализа всех известных конструкций сепараторов СЛВ была разработана классификация их принципов работы. К базовым принципам эксплуатации относятся следующие:

а) физический. В данном случае используются основные принципы гидродинамического поведения многофазной жидкости под действием на нее сил различной природы. Чаще всего в данном случае используются силы гравитации, давления, вибро- или акустические колебания;

б) химический. При его использовании за счет введения в поток различных химических реагентов обеспечивается увеличение степени дисперсности нефтяных частиц с их последующей механической фильтрацией. Обычно используется электролиз и озонирование;

в) биологический. Такой принцип работы заключается во введении в СЛВ микроорганизмов, которые в ходе своей жизнедеятельности обеспечивают разложение нефтепродуктов.

© Малахов А.В., Ткаченко И.В., Рудь Ю.В., 2008

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Детальный анализ методов сепарации базирующихся на предложенной классификации показал, что ни один из существующих методов разделения СЛВ на составные компоненты не может быть охарактеризован как простой и эффективный. В случае полного отделения воды от нефтепродуктов стоимость очистки значительно превышает стоимость получаемых вторичных энергоресурсов и является целесообразной только с экологической точки зрения. Все методы, дающие выходное значение концентрации нефтепродуктов менее 15 мг/л характеризуются одним общим недостатком – сложностью своей технической реализации и большими затратами (экономическими, трудовыми, материальными) на текущее обслуживание. Выполненный системный анализ указывает на необходимость создания такой технологии, которая базируясь на простоте основных механизмов работы будет обладать низкими стоимостными показателями.

Степень дисперсности нефтепродуктов в СЛВ варьируется в широком пределе и с точки зрения гидростатического поведения многофазной жидкости можно констатировать, что хорошо подвергаются плотностной стратификации те нефтепродукты у которых диаметр капель превышает сотые доли миллиметра. При хранении и отстаивании такие грубодисперсные составляющие занимают верхние слои рассматриваемого объема. С точки зрения последующего отделения и переработки наибольший интерес представляют собой тонкодисперсные частицы с диаметром менее 1 мкм . За счет компенсации силы Архимеда силами поверхностного взаимодействия с водой они не всплывают и находятся во взвешенном состоянии, образуя фактически обычную эмульсию. Степень эмульгирования всегда повышается в случае транспортировки льяльных вод, что в основном определяется турбулентными пульсациями движущегося потока и механическим смешением при прохождении через рабочие органы нагнетательного оборудования. При своем движении такие эмульсии подчиняются закону трения жидкости Шведова-Бингама [2] и в диапазоне температур от 50 до $80 \text{ }^\circ\text{C}$ могут быть отнесены к классу вязкоупругих жидкостей. При дальнейшем повышении температуры в эмульсиях начинают проявляться свойства ньютоновских жидкостей. Согласно данным работы [1] концентрация тонкодисперсной нефтяной составляющей обычно лежит в пределах от 20 до 50 мл на 1 л водной фазы.

В том случае, когда рассматривается неподвижная жидкость применительно к СЛВ можно напрямую применять закон Стокса. В соответствии с этим законом расслоение будет происходить тем быстрее, чем ниже значение вязкости смеси и больше размер частиц (глобул) водной составляющей. В этом случае скорость оседания капель воды (см/с) определяется как

$$V = \frac{2r^2 g(\rho - \rho_0)}{9\mu}, \quad (1)$$

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

где r – радиус капли, см; ρ, ρ_0 – плотность водной и нефтяной фазы, $г/см^3$; g – ускорение свободного падения, $см/с^2$; μ – динамическая вязкость нефтяной фазы, $МПа·с$.

На процесс разделения СЛВ в статическом режиме на составляющие оказывает влияние много факторов – концентрация, размеры частиц, их механизм взаимодействия между собой, физико-химические свойства внешней и рассматриваемой сред и т.д. В такой дисперсной системе как СЛВ диссипация энергии, которая вызывается сопротивлением сил вязкостного происхождения обычно расходуется по следующим трем направлениям:

- вязкость, которая проявляется в дисперсной среде;
- взаимодействие движущейся дисперсионной среды с взвешенными частицами;
- структурные изменения, которые вызываются взаимодействием частиц дисперсной фазы.

Если рассматривать основные физические факторы, то к ним можно отнести плотность каждой компоненты, а также ее давление и температуру. В случае изотермического процесса (любое, но неизменное значение температуры льяльных вод) изменение давления в потоке по высоте описывается известным интегралом

$$dP = \rho(Xdx + Ydy + Zdz). \quad (2)$$

С учетом записанных соотношений видно, что чем выше плотность СЛВ, тем медленнее происходит седиментация, а при больших значениях плотности расслоение может стать практически невозможным. При этом плотность СЛВ определяется как

$$\rho_{л.в.} = \sum_{i=1}^n \rho_{Ti} \cdot m_{Ti} + \rho_g m_g, \quad (3)$$

где ρ_v и ρ_{Ti} – соответственно плотность воды и i -ой топливной компоненты СЛВ;

m_g и m_{Ti} – соответственно массовая доля воды и i -ой топливной компоненты в общем объеме СЛВ.

При движении СЛВ существенное влияние на пропускную способность трубопровода оказывают два физических параметра – вязкость и температура. В зависимости от температуры разрыв между вязкостью исходных компонент и вязкостью смеси в целом может существенно различаться. Так, на примере водо-мазутной смеси, показанной на рис.1 видно, что такой разрыв сокращается, только при температуре $85-100$ °C. При этом видно, что начиная с нижней границы указанного диапазона

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

вязкость чистого мазута и вязкость его смеси с водой в 15-20 % соотношении практически не отличаются.

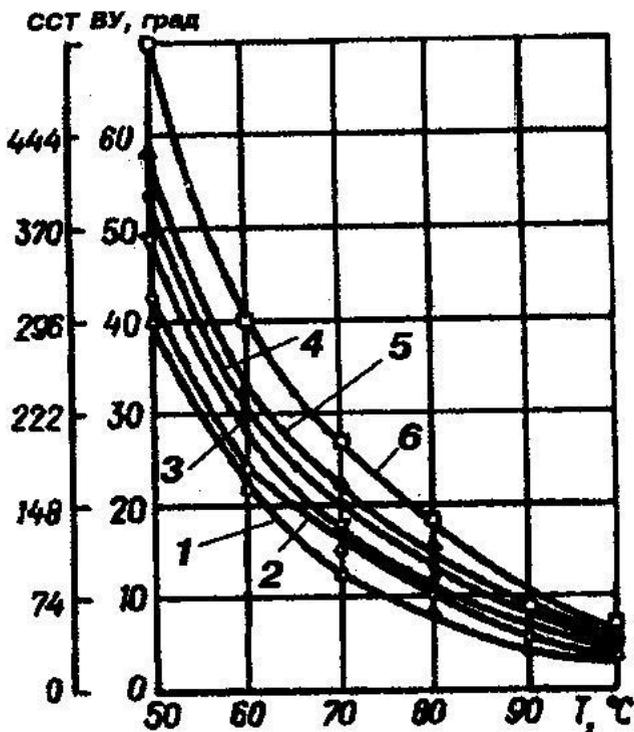


Рис. 1. Зависимость вязкости от температуры смеси мазута с водой:
1 – мазут М-40;
2 – эмульсия мазута при WP=15%;
3 – эмульсия мазута при WP=20%;
4 – эмульсия мазута при WP=30%;
5 – эмульсия мазута при WP=40%;
6 – эмульсия мазута при WP=50%;

При хранении и транспортировке СЛВ очень важными параметрами выступают температура застывания составных компонент смеси и их температура вспышки и самовоспламенения. Относительно температуры застывания следует отметить, что этот параметр должен всегда поддерживаться в оптимальном диапазоне превышающем температуру застывания составных компонент, которая обычно колеблется в пределах от 11 до 25 °С. Рабочая температура судовых льяльных вод должна поддерживаться на уровне ниже 10 °С по сравнению с температурой вспышки и самовоспламенения самой легковоспламеняющейся компоненты. При этом следует учитывать, что воспламенение водо-мазутной

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

эмульсии наступает ранее и при более низком значении температуры по сравнению с чистым мазутом [3]. Теоретическое значение температуры горения можно определить по видоизмененной формуле М.Б. Равича

$$t_{теор} = \frac{Q_n^h + \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{i\phi.m.}}{N} \right) + Q_{\phi.в.} + Q_{дис}}{\sum W C_p}, \quad (4)$$

где Q_n^h – низшая теплота сгорания; $Q_{i\phi.m.}$ – физическая теплота топливных компонент СЛВ ($i=1..N$); $Q_{\phi.в.}$ – физическая теплота воздуха; $Q_{дис}$ – теплота диссоциации продуктов сгорания; W – объем газов; C_p – теплоемкость газов.

С точки зрения переработки составляющих СЛВ следует отметить важность температурного диапазона технологического процесса. Данный параметр существенно видоизменяется в зависимости от вида составляющей. Так, согласно данным работы [2] основные кинематические свойства (касательное напряжение и вязкость) гудронов в диапазоне температур от 0 до 25 °С изменяются практически по линейному закону, а существенно нелинейный характер поведения начинается только с 30 °С.

Если рассматривать смазочно-охлаждающие технические средства то с точки зрения переработки СЛВ необходимо учитывать их плохую коллоидную стабильность, легкую подверженность разложению за счет жизнедеятельности микроорганизмов и в ряде случаев присутствием токсичности [4]. Достаточно подробно главные эффекты, которые проявляются из-за аномальных реологических свойств основных компонент СЛВ приведены в [5].

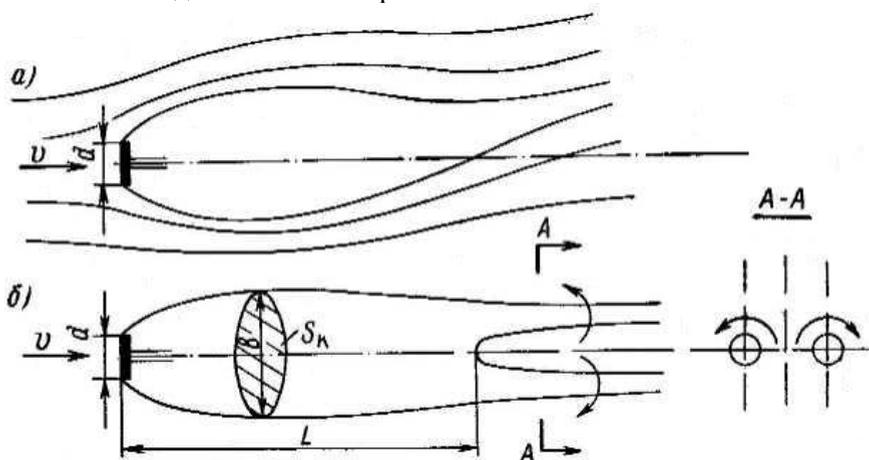
При разработке процесса очистки СЛВ необходимо учитывать все описанные выше особенности поведения многофазного потока как в статике, так и в динамике. Одним из вариантов подобного подхода может являться использование и управление основными гидромеханическими характеристиками движущейся среды. В данном случае подразумевается использование эффекта холодного кипения СЛВ за счет создания гидромеханической суперкавитации внутри специально спрофилированной рабочей камеры, являющейся неотъемлемой частью судовой системы сепарации. При таком техническом решении характер поведения перерабатываемого потока СЛВ будет напрямую определяться условиями его движения внутри кавитационной камеры. Такой подход является перспективным и с экономической точки зрения. Согласно данным работы [2] энергетические затраты на гидромеханическое эмульгирование воды с нефтепродуктами в 10–15 раз меньше, чем при использовании технологии ультразвуковой кавитации.

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Анализ литературы по кавитационному движению одно- и многофазных жидкостей показывает, что до настоящего времени детальное изучение проблемы возникновения суперкавитации в ограниченном (стенками трубы, рабочей камеры и т.п.) потоке осуществлялось в основном экспериментальным путем [2; 6; 7] и частично теоретическим с использованием модели идеальной жидкости [8]. Комбинированный подход является редким и в основном относится к случаю изучения и моделирования основных характеристик суперкавитационных каверн в неограниченном потоке [9].

Следует отметить, что существующие результаты не могут быть использованы применительно к рассматриваемой задаче по отбору у СЛВ водной компоненты. В большинстве случаев известные данные относятся только к гидродинамическим аспектам явления кавитации и не затрагивают процесс холодного кипения одно- или многофазной жидкости. Выполненный анализ литературы указывает на отсутствие работ, в которых рассмотрены вопросы испарения с поверхности суперкавитирующей каверны в процессе движения жидкости в канале или вблизи обтекаемого тела.

Применительно к рассматриваемой задаче наиболее подходящими являются теоретические исследования работы [7], где представлены решения для ряда плоских задач воспроизводящих квазистационарную кавитационную каверну. Там же описана форма каверны при движении в жидкости различных тел. Условная схема математической постановки такого класса задач показана на рис. 2.



Следует отметить, что результаты получены для случая однородной идеальной жидкости и для многофазной неньютоновской жидкости могут рассматриваться только как первое приближение.

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

На рис. 3 показаны сводные теоретические и экспериментальные данные, описывающие начало процесса зарождения кавитации на поверхности эллипсоидов вращения различного удлинения.

Если использовать модель СЛВ как многофазную смесь высокопластичных вязких жидкостей для ее моделирования в численных экспериментах можно использовать уравнения (5)-(7).

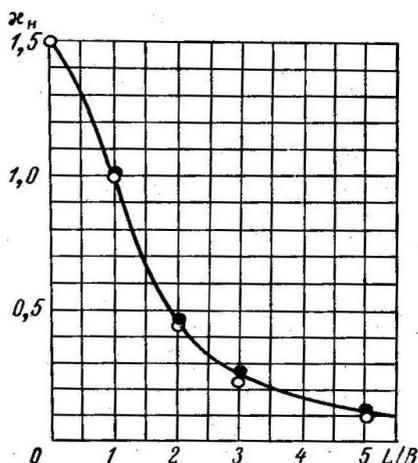


Рис. 3. Коэффициент минимального давления C_p и число кавитации χ_n , соответствующие началу кавитации, для эллипсоидов вращения различного удлинения: • - расчетное значение C_p (по эюре распределения давления); O - экспериментальное значение χ_n

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = a_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\mu + \frac{\tau}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial \Omega}{\partial x} \right) - \frac{\tau}{\rho H^2} \times$$

$$\times \left[2 \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial H}{\partial z} \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \Omega \frac{\partial H}{\partial x} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t} = a_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\mu + \frac{\tau}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial \Omega}{\partial y} \right) - \frac{\tau}{\rho H^2} \times$$

$$\times \left[2 \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial H}{\partial z} \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \Omega \frac{\partial H}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} = a_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\mu + \frac{\tau}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial \Omega}{\partial z} \right) - \frac{\tau}{\rho H^2} \times$$

$$\times \left[2 \frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial y} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial H}{\partial x} \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \Omega \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (7)$$

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

где $\Omega = \text{div} \vec{V}$; $\left(\frac{\partial V_x}{\partial t}, \frac{\partial V_y}{\partial t}, \frac{\partial V_z}{\partial t} \right)$ – ускорение сил инерции; (a_x, a_y, a_z) – ускорение массовых сил (например, сил тяжести, центробежных или центростремительных сил); $\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y}, \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)$ – ускорение сил давления, а оставшаяся часть правой части уравнений представляет собой ускорение сил вязкого трения.

Для оценки скорости потока, при которой начнется кавитация можно использовать уравнение Бернулли. Если скорость и давление жидкости в потоке перед каверной равны V_0 и P_0 , а на струе, соответствующей границе каверны V_{κ} и $P_{н.п.}$ то

$$P_0 + \frac{\rho V_0^2}{2} = P_{н.п.} + \frac{\rho V_{\kappa}^2}{2}, \quad (8)$$

откуда следует, что

$$P_0 - P_{н.п.} = \frac{\rho V_{\kappa}^2}{2} - \frac{\rho V_0^2}{2} = \frac{\rho V_0^2}{2} \left(\frac{V_{\kappa}^2}{V_0^2} - 1 \right) \quad (9)$$

или

$$\chi = \frac{P_0 - P_{н.п.}}{\frac{\rho V_0^2}{2}} = \left(-1 + \frac{V_{\kappa}^2}{V_0^2} \right). \quad (10)$$

В конечном итоге

$$V_{\kappa} = V_0 \sqrt{1 + \chi}. \quad (11)$$

Для очень малых значений числа кавитации χ , т.е. когда $\sqrt{1 + \chi} \approx 1 + \frac{\chi}{2}$, выражение (11) можно упростить

$$V_{\kappa} = V_0 \left(1 + \frac{\chi}{2} \right). \quad (12)$$

Необходимо отметить, что для тонких кавитационных каверн скорость на границе в основном обусловлена только горизонтальными составляющими скорости основного потока и тогда выражение (12) упрощается до вида

$$V_{\kappa} = V_0 \frac{\chi}{2}. \quad (13)$$

При определенных кинематических условиях в процессе возрастания перепада давлений давление в кавитационной каверне достигает

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

минимального значения, остающегося в последующем остается неизменным вне зависимости от роста скорости потока. При одностороннем росте скорости размеры кавитационной каверны начинают сильно увеличиваться до тех пор, пока не наступает срыв вакуума внутри нее. Данный механизм существования каверны может быть описан уравнением

$$\frac{P_2}{P_1} = 2\Theta\varphi\mu \frac{S_c}{S\Delta N} + \frac{P_{min}}{P_1} \left[1 - 2\Theta\varphi\mu \frac{S_c}{S\Delta N} \right], \quad (14)$$

где Θ – коэффициент, учитывающие недостаток скорости у стенки до средней скорости; $S\Delta N$ – площадь рассматриваемого сечения потока; S_c – площадь минимального сечения.

На основании уравнения (14) условие разрушения в канале замкнутой кавитационной полости можно записать как

$$\frac{P_2}{P_1} < 2\Theta\varphi\mu \frac{S_c}{S\Delta N} + \frac{P_{min}}{P_1} \left[1 - 2\Theta\varphi\mu \frac{S_c}{S\Delta N} \right]. \quad (15)$$

С учетом малого порядка второго слагаемого условие (15) указывает на зависимость критерия срыва от коэффициентов сжатия ε и расширения $\frac{S_c}{S\Delta N}$ струи и записывается как

$$\frac{P_2}{P_1} < 2\Theta\varphi\mu \frac{S_c}{S\Delta N}, \quad (16)$$

а условие существования установившейся каверны имеет вид

$$\frac{P_2}{P_1} > 2\Theta\varphi\mu \frac{S_c}{S\Delta N}. \quad (17)$$

При проведении теоретических исследований для задачи о плоском течении с наличием суперкавитационной каверны одна из ее границ была в первом приближении смоделирована в виде горизонтальной плоскости. Такой подход позволил рассмотреть задачу о границе взаимодействия каверны с движущимся потоком в постановке задачи о кавитационном обтекании плоской пластины.

Как показали результаты численных расчетов с ростом расстояния от границы каверны до верхней стенки канала, подъемная сила на внешний контур полости увеличивается. Эти результаты можно увидеть на рис. 4.

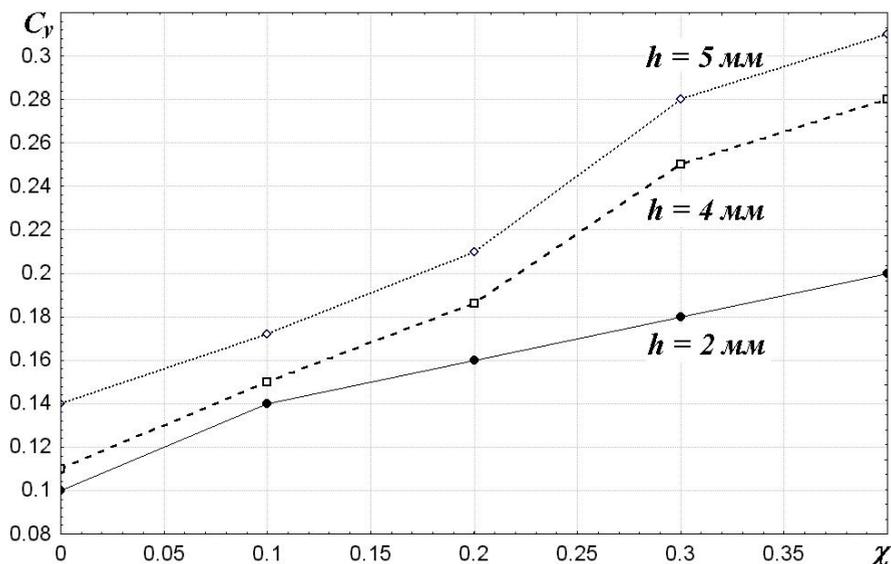


Рис. 4. Зависимость величины C_y от толщины основного потока

В заключение необходимо отметить, что при постоянном испарении водной компоненты с границ кавитационной полости во внутренний объем концентрация нефтепродуктов в СЛВ будет постоянно увеличиваться. Достоинством такого процесса отбора водной компоненты является тот факт, что согласно данным работы [2] при вязком течении сложные структурные единицы нефтепродуктов не подвергаются значительным деформациям. Другими словами способ кавитационного испарения при движении потока не будет изменять реологические свойства остальных компонент судовых льяльных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермошкин Н.Г., Калугин В.Н., Корнилов С.В., Кулешов И.Н. Судовые установки очистки нефтесодержащих вод. – Одесса: Феникс. – 44 с.
2. Яхно О.М., Коваль А.Д., Пищенко Л.И., Паскалов В.П., Яске Н.Н. Кавитация в переработке нефти. – К.: Світ, 1999. – 263 с.
3. Иванов В.М., Нефедов Т.И. Экспериментальные исследования процесса горения частиц натуральных и эмульгированных жидких топлив. // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1962. – С. 34-35 с.
4. Латышев В.Н. Повышение эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей. – М.: Машиностроение, 1985.

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

5. Смолький Б.М., Шульман З.П., Горисловец А.С. *Геодинамика и теплообмен нелинейновязкопластичных материалов.* – Минск, 1970. – 448 с.
6. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. *Кавитация.* – М.: Мир, 1974. – 687 с.
7. Егоров И.Т., Садовников Ю.М., Исаев И.И., Басин М.А. *Искусственная кавитация.* – Л.: Судостроение, 1971. – 283 с.
8. Рождественский В.В. *Кавитация.* – Л.: Судостроение, 1977. – 247 с.
9. Семененко В.Н. *Моделирование процессов суперкавитации.* Дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. – К., 2001. – 278 с.

Надійшла 28.05.08

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ, ВЫРАЖЕННОЙ УРАВНЕНИЕМ ВЕЙБУЛЛА

Предложен метод сокращённых контрольных испытаний деталей машин на сопротивление усталости, позволяющий определять предел выносливости каждой детали. Он основан на использовании трёхпараметрического уравнения кривой усталости Вейбулла, в котором предел выносливости заменён переменным параметром. Этот параметр определяется в процессе построения кривой усталости из условия получения максимального значения коэффициента корреляции.

***Ключевые слова:** сокращённые контрольные испытания; параметры кривой усталости; коэффициент корреляции.*

Контроль стабильности качества серийно выпускаемых деталей и узлов, для которых критерием работоспособности является циклическая прочность, осуществляется путём проведения испытаний ограниченной выборки этих объектов. С целью экономии как самих объектов, так и времени испытаний чаще всего отказываются от традиционных испытаний в пользу форсированных режимов, т.е. проводят так называемые сокращённые испытания. На основе этих испытаний разработаны многие методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости [1]. Поскольку эти методы по ряду причин (использование гипотез, допущений, корреляционных зависимостей и т. д.), могут быть лишь приближёнными, задача повышения их точности и надёжности всегда является актуальной.

Одним из факторов, оказывающих заметное влияние на точность оценки характеристик сопротивления усталости, является выбор математической модели кривой усталости. Математическая модель кривой усталости может обуславливаться теоретическими концепциями, например основанными на статистических воззрениях на природу усталости, либо она подбирается к массиву экспериментальных данных по различным критериям, например по критерию максимума правдоподобия.

Чаще всего для построения кривых усталости применяют полулогарифмические или логарифмические координаты, принимая в качестве математической модели показательное или степенное уравнения, либо уравнение Вейбулла.

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Стремление к более точной и универсальной модели кривой усталости привело к появлению так называемых составных моделей [2; 3]. Составные модели получают при обработке экспериментальных данных в виде двухзвенной кривой усталости путём сопряжения участков, описанных различными уравнениями. Чаще всего левую её часть описывают степенным уравнением, а правую – уравнением Вейбулла. При этом решается задача по определению точки пересечения сопрягаемых участков. На рис. 1 а, б представлены возможные варианты получения составной кривой усталости (случаи пересечения в одной и в двух точках). Вариант, когда эти кривые не пересекаются, практически невозможен, и поэтому не рассматривается.

Координаты точек пересечения могут быть определены из следующих выражений [2].

$$\sigma_{II}^m / (\sigma_{II} - \sigma_R)^{m_w} - \sigma^m \cdot N / 10^{C_w} = 0; \quad (1)$$

$$N_{II} = 10^C / \sigma_{II}^m, \quad (2)$$

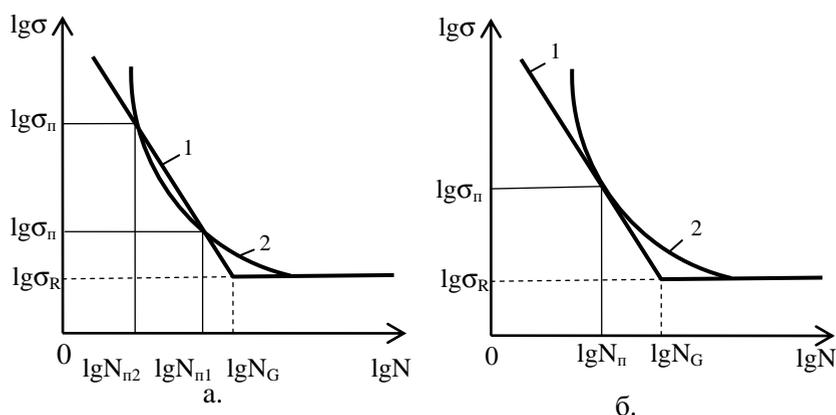


Рис. 1. Возможное взаимное расположение левой и правой частей наклонного участка составной кривой усталости

где σ_{II} и N_{II} – напряжение и долговечность, соответствующие точке пересечения кривых усталости 1 и 2;

σ_R – предел выносливости; σ и N – текущие значения напряжений и долговечности до разрушения соответственно;

m , C , m_w , C_w – параметры степенного уравнения кривой усталости и уравнения Вейбулла.

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Сам подход к построению кривой усталости в виде двухзвенной кривой обусловлен двумя факторами: во-первых, чтобы исключить резкий переход от ограниченной долговечности к неограниченной и, во-вторых, для лучшего соответствия математической модели экспериментальным точкам при долговечностях, близких к границе много и малоциклового усталости. Следует, однако, заметить, что участок кривой усталости, подчинённый уравнению Вейбулла, при этом является экстраполируемым. Экспериментальных исследований, с помощью которых можно было бы обосновать целесообразность применения двухзвенной кривой усталости, пока нет.

Первый вариант построения кривой усталости (рис. 1 а) является наиболее оправданным с точки зрения логики обработки экспериментальных данных. Говоря о втором варианте (рис. 1 б), следует отметить, что такое взаимное расположение кривых усталости при обработке экспериментальных данных маловероятно. Скорее всего, этот вариант сочленения двух частей наклонного участка кривой усталости целесообразен при её построении расчётным путём.

С точки зрения практического использования кривой усталости, например, для оценки предела выносливости по параметрам наклонного участка, удобнее использовать единую математическую модель этого участка.

В работе [4] предложено строить кривую усталости, используя единое для всего наклонного участка уравнение Вейбулла, в котором предел выносливости заменён варьируемым параметром, т.е.

$$(\sigma - \sigma_R)^{m'_w} \cdot N = 10^{C'_w} ; \quad (3)$$

$$(\sigma - A)^{m'_w} \cdot N = 10^{C'_w} , \quad (4)$$

где A – варьируемый параметр.

Проведенный в упомянутой работе сравнительный анализ показал, что в случае использования в качестве уравнения кривой усталости зависимости (3), коэффициент корреляции всегда выше, чем в случаях использования степенного и показательного уравнений, а также уравнения Вейбулла в канонической форме. Известно, что уравнение Вейбулла позволяет по известным параметрам m_w и C_w определять предел выносливости. При этом точность его оценки зависит не только от значений этих параметров, но и от того, насколько сама математическая модель соответствует экспериментальным данным, т.е. зависит от коэффициента корреляции. Для оценки этой зависимости обратимся к экспериментальным данным испытаний образцов, изготовленных из различных марок сталей, гладких и с концентратором напряжений [4]. Ниже в таблице приведены их экспериментальные и расчётные характеристики, найденные из уравнений 3 и 4.

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

Таблица

Экспериментальные и расчётные характеристики образцов,
изготовленных из различных марок сталей

| N обр. | σ , МПа | N, цикл. | Уравнение 3 | | | | Уравнение 4 | | | |
|--|-------------------|-------------|-------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------|--------------------------------------|----------------------------|
| | | | R | σ_{Ri} , МПа | δ_{σ_R} , % | $S_{\sigma_R^3}$, МПа. | σ_{Ri} , МПа | R | δ_{σ_R} , % | $S_{\sigma_R^4}$, МПа. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Сталь 18X2H4BA ($\sigma_R=200$ МПа; $m_W=1,3$; $C_W=7,7$; $m'_W=3,8$; $C'_W=13,6$; $A=125$ МПа; $S_{\sigma_R}=12,8$ МПа) | | | | | | | | | | |
| 1 | 320 | 58700 | 0,9284 | 140,4 | -29,8 | 19,9 | 184,8 | 0,9497 | -7,6 | 12,7 |
| 2 | 320 | 77400 | | 174,8 | -12,6 | | 199,5 | | -0,3 | |
| 3 | 320 | 91100 | | 191,9 | -4,1 | | 207,7 | | 3,9 | |
| 4 | 320 | 103800 | | 204,2 | 2,1 | | 214,1 | | 7,1 | |
| 5 | 320 | 110300 | | 209,4 | 4,7 | | 216,9 | | 8,5 | |
| 6 | 280 | 115600 | | 173,4 | -13,3 | | 179,1 | | -10,5 | |
| 7 | 280 | 183200 | | 205,2 | 2,6 | | 199,2 | | -0,4 | |
| 8 | 280 | 209600 | | 212,5 | 6,3 | | 204,6 | | 2,3 | |
| 9 | 280 | 273400 | | 225,0 | 12,5 | | 214,7 | | 7,4 | |
| 10 | 280 | 304900 | | 229,4 | 14,7 | | 218,7 | | 9,4 | |
| 11 | 240 | 361400 | | 195,6 | -2,2 | | 184,7 | | -7,7 | |
| 12 | 240 | 405800 | | 199,4 | -0,3 | | 188,6 | | -5,7 | |
| 13 | 240 | 513200 | | 206,1 | 3,1 | | 196,2 | | -1,9 | |
| 14 | 240 | 640800 | | 211,4 | 5,7 | | 202,9 | | 1,5 | |
| 15 | 240 | 810700 | | 216,2 | 8,1 | | 209,6 | | 4,8 | |
| 16 | 210 | 735400 | | 184,3 | -7,9 | | 176,9 | | -11,6 | |
| 17 | 210 | 1072000 | | 190,8 | -4,6 | | 187,1 | | -6,5 | |
| 18 | 210 | 1894000 | | 197,6 | -1,2 | | 200,7 | | 0,4 | |
| 19 | 210 | 2148000 | | 198,7 | -0,7 | | 203,4 | | 1,7 | |
| 20 | 210 | 2863000 | | 201,0 | 0,5 | | 209,4 | | 4,7 | |
| | | | | $\sigma_R =$ 198,4 МПа | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -0,80 | | $\bar{\sigma}_R =$ 199,9 МПа | | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -0,05 | |
| Сталь 18X2H4BA ($\sigma_R=240$ МПа; $m_W=1,2$; $C_W=7,5$; $m'_W=2,0$; $C'_W=9,4$; $A=215$ МПа; $S_{\sigma_R}=13,8$ МПа) | | | | | | | | | | |
| 1 | 360 | 80400 | 0,9260 | 215,0 | -10,4 | 16,1 | 208,2 | 0,9440 | -13,3 | 14,9 |
| 2 | 360 | 98100 | | 237,1 | -1,2 | | 225,0 | | -6,3 | |
| 3 | 360 | 112500 | | 250,4 | 4,3 | | 235,6 | | -1,8 | |
| 4 | 360 | 127300 | | 261,1 | 8,8 | | 244,5 | | 1,9 | |
| 5 | 360 | 142300 | | 269,9 | 12,5 | | 252,1 | | 5,0 | |
| 6 | 320 | 156100 | | 236,6 | -1,4 | | 218,1 | | -9,1 | |
| 7 | 320 | 187600 | | 248,4 | 3,5 | | 229,3 | | -4,5 | |
| 8 | 320 | 214300 | | 255,9 | 6,6 | | 236,7 | | -1,4 | |
| 9 | 320 | 261900 | | 265,8 | 10,8 | | 247,1 | | 3,0 | |
| 10 | 320 | 304500 | | 272,2 | 13,4 | | 254,2 | | 5,9 | |
| 11 | 280 | 284200 | | 229,3 | -4,5 | | 211,0 | | -12,1 | |
| 12 | 280 | 413100 | | 242,9 | 1,2 | | 227,0 | | -5,4 | |
| 13 | 280 | 497600 | | 248,2 | 3,4 | | 234,0 | | -2,5 | |

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

Продолжение табл.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--|-----|---------|--------|------------------------------------|---------------------------------------|------|------------------------------------|--------|--------------------------------------|------|
| 14 | 280 | 542400 | | 250,4 | 4,3 | | 237,0 | | -1,3 | |
| 15 | 280 | 679500 | | 255,5 | 6,5 | | 244,2 | | 1,8 | |
| 16 | 250 | 724800 | | 226,8 | -5,5 | | 216,1 | | 6,7 | |
| 17 | 250 | 991600 | | 232,1 | -3,3 | | 224,7 | | -6,4 | |
| 18 | 250 | 1695000 | | 238,6 | -0,6 | | 236,5 | | -1,5 | |
| 19 | 250 | 2158000 | | 240,6 | 0,3 | | 240,9 | | 0,4 | |
| 20 | 250 | 3075000 | | 243,0 | 1,3 | | 246,4 | | 2,7 | |
| | | | | $\bar{\sigma}_R =$ 246,0 МПа | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ 2,5 | | $\bar{\sigma}_R =$ 233,4 МПа | | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -2,8 | |
| Сталь 18X2Н4ВА ($\sigma_R = 415$ МПа; $m_W = 0,9$; $C_W = 7,2$; $m'_W = 1,5$; $C'_W = 8,4$; $A = 401$ МПа; $S_{\sigma_R} = 15,4$ МПа) | | | | | | | | | | |
| 1 | 520 | 140200 | 0,9332 | 328,8 | -20,8 | 24,4 | 386,5 | 0,9421 | -6,9 | 14,3 |
| 2 | 520 | 198400 | | 390,0 | -6,0 | | 417,0 | | 0,5 | |
| 3 | 520 | 207500 | | 396,3 | -4,5 | | 420,4 | | 1,3 | |
| 4 | 520 | 242000 | | 415,7 | 0,2 | | 431,5 | | 4,0 | |
| 5 | 520 | 293600 | | 435,9 | 5,0 | | 443,9 | | 7,0 | |
| 6 | 480 | 287300 | | 393,9 | -5,1 | | 402,6 | | -3,0 | |
| 7 | 480 | 422000 | | 423,8 | 2,1 | | 423,2 | | 2,0 | |
| 8 | 480 | 479400 | | 431,2 | 3,9 | | 429,0 | | 3,4 | |
| 9 | 480 | 534100 | | 436,8 | 5,3 | | 433,5 | | 4,5 | |
| 10 | 480 | 618000 | | 443,2 | 6,8 | | 439,1 | | 5,8 | |
| 11 | 440 | 681300 | | 407,0 | -1,9 | | 402,6 | | -3,0 | |
| 12 | 440 | 873000 | | 414,9 | 0,0 | | 410,4 | | -1,1 | |
| 13 | 440 | 941300 | | 417,0 | 0,5 | | 412,6 | | -0,6 | |
| 14 | 440 | 990700 | | 418,2 | 0,8 | | 413,9 | | -0,3 | |
| 15 | 440 | 1253000 | | 423,2 | 2,0 | | 419,7 | | 1,1 | |
| 16 | 420 | 1076000 | | 400,1 | -3,6 | | 396,1 | | -4,6 | |
| 17 | 420 | 2804000 | | 413,1 | -0,5 | | 414,0 | | -0,2 | |
| 18 | 420 | 2967000 | | 413,6 | -0,3 | | 414,7 | | -0,1 | |
| 19 | 420 | 3476000 | | 414,6 | -0,1 | | 416,7 | | 0,4 | |
| 20 | 420 | 4684000 | | 416,1 | 0,3 | | 419,8 | | 1,2 | |
| | | | | $\bar{\sigma}_R =$ 411,7 МПа | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -0,008 | | $\bar{\sigma}_R =$ 417,4 МПа | | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ 0,006 | |
| Сталь 18X2Н4ВА ($\sigma_R = 370$ МПа; $m_W = 1,4$; $C_W = 7,9$; $m'_W = 3,3$; $C'_W = 12,3$; $A = 320$ МПа; $S_{\sigma_R} = 13,8$ МПа) | | | | | | | | | | |
| 1 | 480 | 59800 | 0,9249 | 310,2 | -16,2 | 19,8 | 339,6 | 0,9375 | -8,2 | 14,0 |
| 2 | 480 | 97600 | | 360,3 | -2,6 | | 365,9 | | -1,1 | |
| 3 | 480 | 121300 | | 377,5 | 2,0 | | 376,4 | | 1,7 | |
| 4 | 480 | 136400 | | 385,7 | 4,2 | | 381,7 | | 3,2 | |
| 5 | 480 | 160300 | | 396,0 | 7,0 | | 388,8 | | 5,1 | |
| 6 | 440 | 172600 | | 360,3 | -2,6 | | 351,9 | | -4,9 | |
| 7 | 440 | 285400 | | 384,4 | 3,9 | | 371,5 | | 0,4 | |
| 8 | 440 | 341400 | | 391,0 | 5,7 | | 377,7 | | 2,1 | |
| 9 | 440 | 388900 | | 395,4 | 6,9 | | 382,1 | | 3,3 | |
| 10 | 440 | 457200 | | 400,3 | 8,2 | | 387,2 | | 4,6 | |
| 11 | 400 | 513900 | | 363,4 | -1,8 | | 350,8 | | -5,2 | |
| 12 | 400 | 724200 | | 371,4 | 0,4 | | 360,6 | | -2,5 | |

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

Продолжение табл.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--|-----|---------|--------|------------------------------------|---------------------------------------|------|------------------------------------|--------|---------------------------------------|------|
| 13 | 400 | 793400 | | 373,2 | 0,9 | | 363,0 | | -1,9 | |
| 14 | 400 | 857100 | | 374,6 | 1,2 | | 365,0 | | -1,4 | |
| 15 | 400 | 1089000 | | 378,6 | 2,3 | | 371,0 | | 0,3 | |
| 16 | 380 | 764900 | | 352,5 | -4,7 | | 342,1 | | -7,5 | |
| 17 | 380 | 1881000 | | 365,5 | -1,2 | | 363,0 | | -1,9 | |
| 18 | 380 | 2614000 | | 368,6 | -0,4 | | 369,4 | | -0,2 | |
| 19 | 380 | 2949000 | | 369,5 | -0,1 | | 371,6 | | 0,4 | |
| 20 | 380 | 4071000 | | 371,7 | 0,5 | | 377,0 | | 1,9 | |
| | | | | $\bar{\sigma}_R =$ 372,5 МПа | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -0,007 | | $\bar{\sigma}_R =$ 367,8 МПа | | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -0,006 | |
| Сталь 35 ($\sigma_R = 190$ МПа; $m_W = 1,2$; $C_W = 7,5$; $m'_W = 4,9$; $C'_W = 16,8$; $A = 55$ МПа; $S_{\sigma_R} = 10,3$ МПа) | | | | | | | | | | |
| 1 | 320 | 62300 | 0,9438 | 140,7 | -25,9 | 14,0 | 173,7 | 0,9720 | -8,6 | 10,9 |
| 2 | 320 | 81900 | | 177,2 | -6,7 | | 189,0 | | -0,5 | |
| 3 | 320 | 86100 | | 183,0 | -3,7 | | 191,7 | | 0,9 | |
| 4 | 320 | 91400 | | 189,7 | -0,2 | | 194,9 | | 2,6 | |
| 5 | 320 | 97800 | | 196,8 | 3,6 | | 198,5 | | 4,5 | |
| 6 | 280 | 126700 | | 180,7 | -4,9 | | 171,6 | | -9,7 | |
| 7 | 280 | 173200 | | 203,5 | 7,1 | | 186,7 | | -1,7 | |
| 8 | 280 | 198600 | | 211,7 | 11,4 | | 193,0 | | 1,6 | |
| 9 | 280 | 221300 | | 217,6 | 14,5 | | 197,8 | | 4,1 | |
| 10 | 280 | 260100 | | 225,5 | 18,7 | | 204,9 | | 7,8 | |
| 11 | 230 | 344500 | | 186,8 | -1,7 | | 166,6 | | -12,3 | |
| 12 | 230 | 563400 | | 201,4 | 6,0 | | 185,5 | | -2,4 | |
| 13 | 230 | 479200 | | 197,2 | 3,8 | | 179,5 | | -5,5 | |
| 14 | 230 | 719800 | | 206,6 | 8,7 | | 194,3 | | 2,3 | |
| 15 | 230 | 805400 | | 208,7 | 9,8 | | 198,1 | | 4,3 | |
| 16 | 200 | 941600 | | 181,3 | -4,6 | | 173,4 | | -8,7 | |
| 17 | 200 | 1094000 | | 183,5 | -3,4 | | 178,2 | | -6,2 | |
| 18 | 200 | 1423000 | | 186,8 | -1,7 | | 186,4 | | -1,9 | |
| 19 | 200 | 1816000 | | 189,2 | -0,4 | | 193,6 | | 1,9 | |
| 20 | 200 | 2085000 | | 190,4 | 0,2 | | 197,6 | | 4,0 | |
| | | | | $\bar{\sigma}_R =$ 192,9 МПа | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -0,015 | | $\bar{\sigma}_R =$ 187,7 МПа | | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ -0,012 | |
| Сталь 35 ($\sigma_R = 240$ МПа; $m_W = 1,3$; $C_W = 7,8$; $m'_W = 3,6$; $C'_W = 13,2$; $A = 170$ МПа; $S_{\sigma_R} = 12,9$ МПа) | | | | | | | | | | |
| 1 | 360 | 73700 | 0,9327 | 180,1 | -25,0 | 20,9 | 224,0 | 0,9522 | -6,7 | 13,5 |
| 2 | 360 | 97400 | | 214,8 | -10,5 | | 239,3 | | -0,3 | |
| 3 | 360 | 118500 | | 235,1 | -2,0 | | 249,4 | | 3,9 | |
| 4 | 360 | 136700 | | 248,1 | 3,4 | | 256,4 | | 6,8 | |
| 5 | 360 | 183300 | | 270,7 | 12,8 | | 270,0 | | 12,5 | |
| 6 | 320 | 202200 | | 237,2 | -1,2 | | 234,3 | | -2,4 | |
| 7 | 320 | 267500 | | 253,2 | 5,5 | | 246,0 | | 2,5 | |
| 8 | 320 | 294300 | | 258,0 | 7,5 | | 249,7 | | 4,0 | |
| 9 | 320 | 341600 | | 264,7 | 10,3 | | 255,4 | | 6,4 | |
| 10 | 320 | 427800 | | 273,5 | 14,0 | | 263,6 | | 9,8 | |
| 11 | 280 | 403100 | | 231,3 | -3,6 | | 221,5 | | -7,7 | |

**Технические проблемы эксплуатации
судового оборудования**

Продолжение табл.

| | | | | | | | | | | |
|--|-----|---------|--------|------------------------------------|--------------------------------------|------|------------------------------------|--------|--------------------------------------|------|
| 12 | 280 | 614800 | | 244,8 | 2,0 | | 235,7 | | -1,8 | |
| 13 | 280 | 731200 | | 249,2 | 3,8 | | 241,1 | | 0,5 | |
| 14 | 280 | 809500 | | 251,5 | 4,8 | | 244,1 | | 1,7 | |
| 15 | 280 | 939400 | | 254,6 | 6,1 | | 248,4 | | 3,5 | |
| 16 | 250 | 984300 | | 225,5 | -6,0 | | 219,7 | | -8,5 | |
| 17 | 250 | 1903000 | | 235,2 | -2,0 | | 236,5 | | -1,5 | |
| 18 | 250 | 2176000 | | 236,7 | -1,4 | | 239,5 | | -0,2 | |
| 19 | 250 | 2713000 | | 238,8 | -0,5 | | 244,3 | | 1,8 | |
| 20 | 250 | 3816000 | | 241,4 | 0,6 | | 251,1 | | 4,6 | |
| | | | | $\bar{\sigma}_R =$ 242,2 МПа | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ 0,009 | | $\bar{\sigma}_R =$ 243,5 МПа | | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ 0,015 | |
| Сталь 35 ($\sigma_R = 280$ МПа; $m_W = 1,4$; $C_W = 7,8$; $m'_W = 3,1$; $C'_W = 11,7$; $A = 235$ МПа; $S_{\sigma_R} = 11,0$ МПа) | | | | | | | | | | |
| 1 | 400 | 63000 | 0,9616 | 261,2 | -6,7 | 15,0 | 275,6 | 0,9756 | -1,6 | 10,5 |
| 2 | 400 | 68900 | | 269,8 | -3,6 | | 280,4 | | 0,1 | |
| 3 | 400 | 81400 | | 284,4 | 1,6 | | 289,1 | | 3,3 | |
| 4 | 400 | 88700 | | 291,3 | 4,0 | | 293,3 | | 4,8 | |
| 5 | 400 | 99700 | | 300,0 | 7,1 | | 298,9 | | 6,7 | |
| 6 | 360 | 139400 | | 281,3 | 0,5 | | 273,9 | | -2,2 | |
| 7 | 360 | 181700 | | 294,8 | 5,3 | | 284,7 | | 1,7 | |
| 8 | 360 | 193100 | | 297,6 | 6,3 | | 287,0 | | 2,5 | |
| 9 | 360 | 252400 | | 308,5 | 10,2 | | 296,8 | | 6,0 | |
| 10 | 360 | 295500 | | 314,0 | 12,1 | | 302,2 | | 7,9 | |
| 11 | 320 | 310700 | | 275,6 | -1,6 | | 263,8 | | -5,8 | |
| 12 | 320 | 503100 | | 288,5 | 3,0 | | 278,4 | | -0,6 | |
| 13 | 320 | 587900 | | 291,8 | 4,2 | | 282,7 | | 1,0 | |
| 14 | 320 | 641700 | | 293,5 | 4,8 | | 285,0 | | 1,8 | |
| 15 | 320 | 785200 | | 297,1 | 6,1 | | 290,0 | | 3,6 | |
| 16 | 290 | 1274000 | | 273,8 | -2,2 | | 270,9 | | -3,3 | |
| 17 | 290 | 2063000 | | 278,5 | -0,5 | | 280,1 | | 0,0 | |
| 18 | 290 | 2481000 | | 279,9 | 0,0 | | 283,3 | | 1,2 | |
| 19 | 290 | 2764000 | | 280,7 | 0,2 | | 285,1 | | 1,8 | |
| 20 | 290 | 2987000 | | 281,2 | 0,4 | | 286,3 | | 2,3 | |
| | | | | $\bar{\sigma}_R =$ 287,2 МПа | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ 0,026 | | $\bar{\sigma}_R =$ 284,4 МПа | | $\bar{\delta}_{\sigma_R} =$ 0,016 | |

В таблице приняты следующие обозначения: R – выборочный расчётный коэффициент корреляции; S_{σ_R} , $S_{\sigma_{R3}}$ и $S_{\sigma_{R4}}$ – средние квадратичные отклонения предела выносливости, найденные по методу «вверх-вниз»; и по данным колонок 5 и 8 соответственно; δ_{σ_R} – погрешность оценки предела выносливости.

Индивидуальные значения пределов выносливости и их относительные погрешности определялись по формулам

$$\sigma_{Ri} = \sigma - \left(\frac{10^{C'_W}}{N} \right)^{1/m'_W} + \sigma_R - A; \quad (5)$$

Технические проблемы эксплуатации судового оборудования

$$\bar{\delta}_{\sigma_R} = \frac{\bar{\sigma}_R - \sigma_R}{\sigma_R} \cdot 100. \quad (6)$$

Анализ полученных результатов показывает, что погрешность оценки среднего значения предела выносливости, найденного с помощью уравнения 4, как правило, несколько ниже, чем с помощью уравнения 3. Это обусловлено более высоким выборочным коэффициентом корреляции R , который для уравнения 4 во всех случаях был выше.

Что касается погрешностей оценки индивидуальных пределов выносливости, то и они при использовании уравнения 3 в целом оказались ниже. В тоже время применение уравнения Вейбулла в каноническом виде, привело в ряде случаев к значительным погрешностям (более 20%). При этом максимальные значения δ_{σ_R} имели место при минимальных долговечностях. Данный факт подтверждает то, что в верхней своей части кривая усталости, подчинённая уравнению Вейбулла, неудовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Сравнение выборочных дисперсий предела выносливости показало, что при использовании уравнения 4 эта статистическая характеристика во всех случаях оказалась ближе к S_{σ_R} , чем при использовании уравнения 3. Это также указывает на неудовлетворительное согласование уравнения Вейбулла с экспериментальными данными.

Таким образом, использование уравнения кривой усталости с варьируемым параметром для определения предела выносливости вместо классического уравнения Вейбулла, позволило повысить точность оценки как индивидуальных пределов выносливости, так и его среднего значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Олейник Н.В., Скляр С.П. Ускоренные испытания на усталость. – К.: Наукова думка, 1985. – 304 с.
2. Олейник Н.В., Кобаков А.Г. Оперативная оценка сопротивления усталости материалов и деталей. – Одеса.: Астропринт. – 1998. – 142 с.
3. Шумило. До вибору матеріалу для виготовлення відповідальних деталей // Вісник ОНМУ. – 1999. – № 2. – С. 15-19.
4. Коноплев А.В. Повышение точности построения кривой усталости при использовании трехпараметрического уравнения Вейбулла // Вісник ОНМУ. – 2007. – № 22. – С. 131-136.

Надійшла 12.05.08

УДК 159.9.072:378.147.227

Л.В. Кошарская
А.А.Турлак
Т.А.Турлак

КОНТРОЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ: ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТЬ И ГОТОВНОСТЬ СТУДЕНТА

Рассматривается сущность и особенности тестового контроля, влияние эмоционального состояния студента на процесс и результаты контрольного тестирования, необходимость формирования тестовой стратегии и психологической подготовки студента к работе с тестами.

***Ключевые слова:** контроль, тест, тестовая стратегия, тестовая тревожность, эмоции, психологическая готовность.*

Учебный процесс в современных высших учебных заведениях представляется как система организационных и педагогических, воспитательных и индивидуальных мер, направленных на реализацию содержания образования в соответствии с государственными стандартами. Эффективность учебных занятий, самостоятельной работы и результатов учебы студентов зависят в целом не только от тщательной организации и обеспечения, но и систематического контроля за ними. Контроль является органической составной частью учебного процесса и может осуществляться в разных формах.

Опыт многих поколений преподавателей и основные положения дидактики говорят о том, что если хочешь привить солидные знания и умения, то необходимо тщательно продумывать формы и методы контроля и систематически осуществлять его. Процесс усвоения учебного материала невозможен без оценки: везде должен действовать принцип обратной связи. Именно поэтому методы непрерывного и интенсивного контроля знаний являются существенными компонентами современных информационных технологий в образовании, и тестирование – важнейший из них. Этим мотивируется стремление к широкому внедрению тестирования в учебный процесс.

Из всего множества видов тестов нас больше всего интересуют тесты знаний как стандартизированные задания, конструируемые на основе учебного материала и предназначенные для оценки овладения учебными знаниями и навыками [1; 2]. Они обычно создаются применительно к конкретным уровням обучения и учебным предметам, как правило, с расчетом на групповое проведение [3].

© Кошарская Л.В., Турлак А.А., Турлак Т.А., 2008

Существует несколько мнений об этой форме контроля знаний: от горячего одобрения до не менее резкой критики, причем каждое из мнений имеет вполне объективное обоснование. «За»: признание тестов качественным и объективным, надежным и экономичным способом оценки знаний, дающим возможность проверки большого объема материала за сравнительно короткое время у всех тестируемых студентов. Тесты признаются средством радикального преобразования учебного процесса в сторону снижения его трудоемкости [4]. В ряде стран их использование заменяет опросно-экзаменационную систему контроля знаний. «Против»: отказ от тестирования мотивируется несовершенством самих тестов, не всегда взаимодополняемостью и упорядоченностью их либо по степени трудности, либо по логике постановки вопросов и заданий, даже несоответствием их требованиям учебных программ и учебной литературы.

Итак, признавая тестирование достаточно эффективным, хотя в некоторой степени и противоречивым способом проверки знаний, следует отметить ряд специфических особенностей, которые обязательно должны учитываться в ходе его применения на практике. Во-первых, при всех очевидных достоинствах и преимуществах тесты в ситуации массового контроля явно уступают менее стандартизованным методикам и процедурам в случаях, когда требуется провести причинную диагностику действий или психологических свойств тестируемого [5]. Однако необходимо отметить, что тест должен создаваться лишь в том случае, если он может зафиксировать знания испытуемого студента более корректно, чем это позволяют делать другие методы, если создание тестов может быть приведено в соответствие с дидактическими задачами. Во-вторых, тестирование как форма контроля обуславливает его связь с личностно-психологическими качествами студента, подвергающегося тестированию. В-третьих, наличие или отсутствие прошлого положительного и/или отрицательного опыта тестирования и его результатов, необходимость выбрать правильный ответ за сравнительно короткое время, и, наконец, учет эмоционального состояния самого студента перед тестированием и во время его. Все это заставляет обратить внимание на психологическую подготовку и готовность студента к контрольному тестированию. Дело в том, что психологическая готовность, чаще называемая психологической установкой, представляет складывающееся на основе имеющегося опыта устойчивое психологическое предрасположение человека определенным образом (положительно/негативно) реагировать на явления действительности, организовывать свое поведение и связанные с этими явлениями эмоциональные состояния.

Исследование авторов имело целью выявить особенности применения тестов на практике и связь их с личностно-психологическими проблемами студентов, подвергающихся тестированию, в частности – необходимость психологической подготовки и готовности студента к контрольному тестированию. Проблема получила освещение в пило-

тажном исследовании, проведенном одновременно в двух вузах – Одесском национальном морском университете (ОНМУ) и Витебском государственном технологическом университете (ВГТУ, Республика Беларусь). Всего в исследовании опрошено 135 респондентов, обучающихся на первом-пятом курсах дневного и заочного обучения обоих вузов и факультете повышения квалификации и переподготовки кадров ВГТУ, в том числе – 95 студентов в Витебском вузе и 40 – в Одесском. Выборка проводилась методом статистической случайности.

В числе опрошенных 78 мужчин и 57 женщин в возрасте: 19-20 лет – 46 человек, от 21 года до 22 лет – 71, 23 года – 25 лет и старше – 18 респондентов. Первый и второй курс представлены 41, третий и четвертый – 78, пятый и ФПК – 16 респондентами. Необходимость ранжирования респондентов по курсу обучения и возрасту обусловлена, как и предполагалось, хотя и незначительными, но различиями в ответах [6].

Универсальным средством контроля по любой учебной дисциплине признали тесты 64 % всех опрошенных, ограничили применение их в изучении иностранного языка – 14, возможность такого использования допускает один процент и категорическое «нет» универсальности тестов высказали шесть процентов респондентов обоих вузов. Дописанное респондентом собственное мнение: «нельзя использовать при контроле по любой дисциплине» – составляет всего один процент. Последние показатели незначительны по количеству, но все же отражают неоднозначное отношение к тестированию. Очевидно, при подготовке к контрольному тестированию любого вида (текущему, итоговому), следует обратить внимание студента на влияние его эмоций на результаты тестирования.

Более половины опрошенных (52 %) определяют назначение тестов только как форму контроля знаний в отличие от других предложенных в анкете назначений, при этом за использование тестов в текущем контроле – 38, а в итоговом – 24 % всех опрошенных. Рациональность такого использования признали шестьдесят три процента, в том числе более трети опрошенных студентов первого и второго курсов. В то же время противоположного мнения – нерациональности использования тестов для контроля – придерживаются около двенадцати процентов. Такая оценка коррелирует с отрицательным отношением к тестам как универсальному средству контроля в целом.

Интересно в этом случае проследить сочетание тестов с другими формами контроля: в целом за сочетание – 37, с письменной работой – 11, с устным общением с преподавателем – 18,5 процентов опрошенных¹. Но и в этом случае около 10 % отметили возможность снижения

¹ Желательность разных форм устного общения с преподавателями в процессе контроля знаний (тестового, дистанционного) подтверждают и данные прошлых исследований авторов [5]

эффективности тестов при сочетании их с другими формами контроля, против такого сочетания высказался каждый пятый (21 %) респондент. Сочетание: 37 % за и 31 % против – при общем в 64 процента признании универсальности тестов, – обуславливает необходимость не только критического подхода к составлению их содержания, но и формирования навыков тестирования (около 10 % всех опрошенных).

Еще один блок вопросов (их в анкете всего три) посвящен предварительному ознакомлению с характером вопросов и объективности результатов тестирования. Положительно высказались за предварительное ознакомление с характером тестовых вопросов как одним из условий понимания сущности задания более 60 % опрошенных, из них – треть студентов первого и второго курсов. Предварительное ознакомление с характером (не с содержанием!) вопросов в тестах поможет освоить структуру теста (16 %) и облегчит понимание сущности задания (40 %) – таково общее мнение респондентов. Такое ознакомление ни в коем случае не является «натаскиванием» на нужный ответ. Давно известно, что использование специальных терминов способствует однозначности понимания вопроса и тем самым резко сокращает перебор возможных вариантов ответа на вопросы теста. Именно поэтому термины и понятия, используемые в тестах, должны быть общеизвестны, соответствовать требованиям учебной программы и строго соответствовать первоисточникам учебной литературы [7; 8].

Объективность результатов тестирования как основной критерий качества тестовых измерений отметили всего около 9 процентов опрошенных, но оно должна обеспечиваться, по мнению респондентов, общими для всех тестируемых студентов факторами: стандартизацией условий проведения тестирования – 38, 5 %, одинаковостью баллов за одинаковые результаты независимо от состояния студента – более 28 процентов; исключение предвзятости в оценке результатов тестирования отметили 23 % респондентов. Однако семнадцать процентов опрошенных сошлись во мнении о необеспеченности объективности результатов, причем большинство из них на этот раз – студенты старших курсов. Что тому причиной? Недостаточное собственное усердие при подготовке и в ходе учебного процесса, надежда на вездесущий «авось» и везение или все-таки сказались личностные факторы? Нас в этом блоке ответов об объективности результатов тестирования порадовала собственная правдивость студентов, обосновавших свое мнение не столько личными особенностями или эмоциональным состоянием (студенты не отрицают их значение), сколько соблюдением вполне реальных условий тестирования. Некоторый свет на причины такого мнения проливает дальнейший анализ ответов респондентов на вопросы: влияет ли прошлый опыт тестирования на успешность работы с тестом; адекватность полученных результатов истинным знаниям студентов; дают ли результаты тестирования эффективную информацию для ликвидации ошибок в понимании

изучаемого материала, и, наконец, можно ли по результатам тестирования судить о будущих успехах студента и его дальнейшей карьере.

Прошлый опыт тестирования в целом сказывается на успешности выполнения тестовых заданий – это мнение почти трети всех опрошенных, они же отметили влияние навыков тестирования на скорость работы с тестом² и уверенность в правильности результата. А вот прошлый положительный или отрицательный опыт и его влияние оценены респондентами по-разному: положительный опыт может обусловить излишнюю успокоенность и появление ошибок – мнение около 6 %, прошлые отрицательные результаты порождают тревожность и неуверенность в успехе – оценка семнадцати процентов респондентов, большинство из которых составили студенты младших курсов. Неоднозначно оценено респондентами и отсутствие опыта тестирования: от появления страха и паники (более 12 %) до сохранения спокойствия при работе – около четырех процентов. И каждый десятый (уверен в своих знаниях?!) отказал прошлому опыту любого характера во влиянии на успешность тестирования. Приблизительно три процента всех респондентов высказали собственные мнения по этому поводу, сущность большинства из них свелась к пересказу предложенных ответов, однако отмечена и желательность предварительного тестирования для повышения результатов контрольного.

Что касается адекватности результатов решения тестовых заданий настоящим (истинным) знаниям студентов, то здесь присутствует значительный разброс мнений: от частичного соответствия («менее половины знаний» – дописано респондентом) до неадекватности отражения – почти четверть опрошенных, угадывание и исключение неверных ответов – мнение 27 %, отражение только того, что усвоено в процессе изучения – четырнадцать процентов респондентов. Один из десяти опрошенных считает, что такой информации нет. И эти же 10 % склоняются к тому, что неправильные ответы, включенные в тест, ухудшают/тормозят выбор правильного ответа. Особо следует отметить мнение почти тридцати процентов респондентов, что результаты выполнения тестов не оценивают креативные способности студента, умение излагать свои мысли (вопросы и ответы тестов должны быть стандартизированы – *авт.*), и более четверти указали на дефицит времени для правильной формулировки или выбора ответа. Следует оценить и юмор одного процента респондентов, высказавших свое мнение по поводу известной категории людей, которым везет: везение, удача, угадывание – эти факторы часто называются студентами при ответах на вопросы.

² Авторы, как и специалисты по психологии и информатике, считают, что идеальным вариантом работы с тестом является время не более двух минут, затрачиваемое на обдумывание одного задания

Из этого блока вопросов и ответов на них закономерно вытекает следующий: результаты тестирования как основа для ликвидации допущенных ошибок. За признание результатов тестирования в качестве факта усвоения материала без указания на ошибку и оценку итогов, а не сущности такого усвоения, высказались более половины опрошенных. И только около трети всех респондентов признали возможность увидеть из ответов тот материал, который не усвоил студент. Очевидно, что эти моменты следует учитывать при подготовке к следующему контрольному тестированию.

Можно ли по результатам тестирования прогнозировать будущие успехи студента в учебе? Вполне возможно – ответили 16 %; тесты только для решения конкретных задач и оценки успехов студента в учебной аудитории – таково мнение двадцати восьми процентов всех опрошенных. Можно ли по результатам тестирования предполагать реализацию личности в конкретной профессии и/или долгосрочное протекание карьеры специалиста после окончания вуза? Проблематично, предположить нельзя – таков ответ 54 % опрошенных. Достоверность любого теста проверяется практикой, выявлением динамики успехов в процессе деятельности [8]. Практически судить об успехах специалиста и его способностях можно по совокупности следующих показателей: быстрому темпу в овладении соответствующей деятельностью; высокому уровню достижений и сильной, действительно устойчивой склонности человека к занятию этой деятельностью [9]. Однако не следует забывать, что основы этих успехов закладываются в процессе обучения, овладения теорией и практическими навыками при систематическом контроле за их качеством.

И, наконец, интересовавшая исследователей проблема, – влияние психологических особенностей личности студента и его эмоций на эффективность и качество работы с тестами, получила полное подтверждение: 55 % опрошенных не сомневаются в существовании такого влияния в целом и при тестировании по отдельным дисциплинам в частности! Только пять процентов (один из 20!) считают, что эмоциональное состояние студента никак не сказывается на результатах тестирования.

Можно в известной мере согласиться с точкой зрения как большинства, так и меньшинства. Почему? Экспериментально установлено, что состояние повышенного напряжения снижает способность человека применять твердо усвоенные ранее методы к новому материалу. Значимость результата тестирования для каждого студента может препятствовать переносу принципов решения на новые задачи (вот где учет прошлого опыта тестирования!), что характерно для поведения человека в экстремальных для него условиях, в том же тестировании. Эмоциональное перевозбуждение может приводить к появлению другого отрицательного момента в мыслительном процессе – тенденции к стереотипизации. Тот же имеющийся положительный/негативный опыт

прошлого тестирования может сыграть здесь не всегда положительную роль: выполнение сложных тестов может ухудшаться [7; 8].

Знакомы ли студенты с этими выкладками психологов или нет, (ознакомить надо бы!), тем не менее способность человека понимать, уметь регулировать и контролировать свое эмоциональное состояние как условие успешной работы над тестами признали более трети всех опрошенных, стремиться к этому хотят 36 %, действовать адекватно обстоятельствам будут двадцать четыре процента респондентов. На первое место в управлении эмоциями следует поставить положительную оценку студентами роли и значения знаний и уверенности в них. Почти 53 % всех опрошенных утвердили этот фактор как основной в нейтрализации и «снятии» отрицательного влияния эмоций, среди них каждый третий респондент – студент старших курсов, каждый пятый – младших. Поставить эмоции на службу своим целям, считают студенты, значит быть уверенным в своих знаниях, управлять своими эмоциями, сдерживать их и заставить себя спокойно работать. Негативную роль эмоций в принятии решения по тесту признали 12 % всех студентов. Влияние как положительных, так и отрицательных эмоций, способных в конкретной ситуации оказывать разное воздействие на человека, сорок один процент опрошенных отметил однозначно, каждый шестой обратил внимание на значение положительного эмоционального состояния для благоприятного решения любой задачи, какой бы она ни была. Это обуславливает факторы формирования такого состояния, в числе которых психологическая подготовка и тренировка по управлению собственными эмоциями (12 % опрошенных). Значит, определенную часть тестовых заданий желательно обработать в условиях, не столь эмоционально напряженных. Скорее всего, это могут быть тесты по отдельным разделам (темам) программы курса. Каждый пятый опрошенный фактором в формировании положительного эмоционального состояния назвал самоконтроль и концентрацию внимания; более десяти процентов – сдерживание необоснованных импульсов и «снятие» тестовой тревожности. Под тестовой тревожностью понимают психическое состояние, вызываемое возможными или вероятными неприятностями, неожиданностью и выражающееся в специфических переживаниях опасения, волнения и т.п. Тестовая тревожность может препятствовать успешной деятельности, если она неадекватна ситуациям, ее вызвавшим. «Мягкие» формы тревожности служат человеку сигналом к устранению недостатков, воспитанию уверенности в себе, решительности. Тем не менее, более двадцати процентов респондентов, кроме слушателей ФПК (это люди старше 25 лет), отметили остающееся волнение и опасение за исход тестирования.

Все это обуславливает необходимость разработки и использования тестовой стратегии, включающей вопросы теории и практики подготовки и применения тестовых заданий [10].

Не умаляя важности других организационно-технических элементов тестовой стратегии, следует отметить два из них – это значимость

проверяемых знаний в общей системе знаний и контроль их, а также обязательную предварительную психологическую подготовку студентов для преодоления «психологического» барьера в виде влияния эмоций и стрессов, формирования навыков и умения работать с тестами, организацию мыслительной деятельности [11]. В целом тестовую стратегию часто рассматривают как стратегию психологической подготовки студента к тестированию, особенно контрольному.

Полученные результаты исследования позволяют сделать некоторые выводы и рекомендации для преподавателей и студентов.

1. Полезно ознакомить студентов, в первую очередь младших курсов, с характером вопросов, включаемых в тест.

2. Преподавателю при анализе результатов тестирования рекомендовать обращать внимание студентов на ошибки и пробелы в изучаемом материале.

3. При подготовке к тестированию учитывать имеющийся у студентов положительный опыт работы с тестами и пояснять причины неудач, особенно у студентов первого и второго курсов.

4. Обязательно информировать студентов о влиянии их собственного эмоционального состояния на результаты тестирования. Учить студентов анализировать свое состояние и регулировать эмоции.

5. Утвердить студентов в мысли, что знание материала и уверенность в знаниях являются оптимальными факторами управления эмоциями, способом «снятия» тревожности и успеха в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Общая психология / Под ред. А.В. Петровского: Психологический лексикон. Энциклопедический словарь. В 6 т. / Ред. сост. Л.А. Карпенко; под общ. ред. А.В. Петровского. – М.: ПЕРСЭ, 2005.*
2. *Психологический словарь / Под ред. В.П. Зинченко и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Астрель: АСТ: Транзиткнига, 2006.*
3. *Пашков А.П. Контроль результатов обучения: Краткие методические рекомендации для преподавателей / Под ред. А.А. Вассермана. – Одесса: ОНМУ, 2006.*
4. *Самылкина И.Н. Построение тестовых заданий по информатике: Методическое пособие. – М.: БИНОМ, Лаборатория базовых знаний, 2004.*
5. *Кошарская Л.В., Турлак А.А., Турлак Т.А. Новые учебные технологии в совершенствовании системы высшего образования // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Вип. 23. – Одеса, 2007.*
6. *Аналитическая записка к социологическому исследованию: Контрольное тестирование: психологическая подготовка и готовность студента. – Витебск: УО «ВГТУ», 2008.*

Вопросы педагогики высшей школы

7. Анастаси А.А. Психологическое тестирование. В 2-х т. – М.: Мысль, 1982.
8. Грановская Р.М. Элементы практической психологии. – 2-е изд. – Л.: ЛГУ, 1988.
9. Турлак Т.А. Основы психологии и педагогики: Учебно-методический комплекс для студентов непедагогических вузов / Научн. ред. М.А. Слемнёв. – Витебск: УО «ВГТУ», 2005.
10. CHATTERJИ, M. *Designing and using tools for education assessment*, Boston, MA: Allyn and Bacon, 2003
11. GRONLUND, N. *Assessment of student achievement (7th) edition*, Boston, MA: Allyn and Bacon, 2003.

Надійшла 20.06.08