НАУЧНЫЕ РАБОТЫ

Азово-Донское ГБУВПиС, Октябрьский ССРЗ, ВГАВТ

64
Л.А. Царенок, В.К. Васягин, О.Н. Фунтов, Н.Н. Арефьев, Н.Ф. Попов. **Модернизация грунтозаборного устройства на земснаряде «Донской-607»**

Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

65
О.В. Леонова, А.Б. Дарюхин. **Исследование работоспособности элементов металлоконструкции портальных кранов с деформационными повреждениями**

68
Игорь Костин. **Вопросы оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений**

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (СПГУВК)

71
Анатолий Нырков, Аркадий Черненко. **Оценка погрешности коррелированных навигационных измерений**

75
А.А. Иванченко, В.Н. Окунев, Ю.В. Тамбовский. **Проблемы и пути обеспечения экологической безопасности судов**

79
А. В. Саушев, В. А. Шошмин. **Целевая функция в задачах синтеза судовых и береговых электромеханических систем**

Волжская государственная академия водного транспорта (ВГАВТ)

81
В.С. Наумов, А.Н. Бородин. **Методика определения расположения потенциальных источников разлива нефти**

Северо-Двинское ГБУВПиС

84
Д.В. Дмитриенко, Л.С. Первушин, В.Г. Шмыков. **Гидравлический расчет Рубежско-Коптельского узла р. Северная Двина**

* Названия некоторых статей приведены в сокращенном виде

УЧРЕЖДЕНИЯ: Азово-Донское государственное бассейновое управление водных путей и судоходства (ГБУВПиС), Октябрьский судостроительно-судоремонтный завод (ССРЗ), ВГАВТ

ТЕМА: Модернизация грунтозаборного устройства на земснаряде «Донской-607»

АВТОРЫ: Л.А. ЦАРЕНОК, В.К. ВАСЯГИН, О.Н. ФУНТОВ (Нижне-Донской район гидросооружений Азово-Донского ГБУВПиС), Н.Н. АРЕФЬЕВ (Октябрьский ССРЗ), Н.Ф. ПОПОВ (ВГАВТ)

АННОТАЦИЯ: В статье приведены особенности реализации проекта модернизации грунтозаборного устройства на земснаряде «Донской-607»

До модернизации земснаряд «Донской-607» проекта 1-516 был оснащен двумя типами устройств:

а) уширенным траншейным грунтоприемником с принудительным подводом грунта (конструкции проф. А.С. Старикова);

б) эллиптическим траншейным грунтоприемником с гидравлическим рыхлителем грунта (с коллектором и соплами, расположенными под всасывающим зевом).

Уширенный грунтоприемник способен эффективно работать только на наносных рыхлых грунтах с толщиной слоя до 1 м. При разработке плотных слежавшихся грунтов существенно повышается нагрузка на становую лебедку, и необходима полная остановка земснаряда.

Эллиптический же грунтоприемник с гидравлическим рыхлителем грунта достаточно широко применяется при дноуглублении для разработки траншейным способом плотных слежавшихся толстыми слоями грунтов. Однако при капитальных работах, когда земснаряд работает «в берег» с большими толщинами слоев разрабатываемого плотного грунта, его эффективность падает. При разработке грунтов с включением глинистых линз производительность снижается в несколько раз (до 70-80 м^3/ч по грунту).

Главной целью модернизации являлось создание грунтозаборного устройства, способного при капитальных работах разрабатывать слежавшиеся плотные грунты (в том числе «в берег»), отвечающего ряду требований: оно должно применяться в составе земснаряда проекта 1-516, обладать достаточно простой конструкцией (например, чтобы его можно было изготовить на Константиновских мастерских) и дешевизной.

В результате с учетом рекомендаций [1] был спроектирован и изготовлен грунтоприемник с гидравлическим рыхлителем и принудительным подводом грунта к всасывающему зеву наконечника (сопла для транспортирования грунта из зоны рыхления к всасывающему зеву грунтоприемника рассчитывались на основании теории размыва [2] и диффузии грунта [3]). Общий вид устройства показан на фото.

ИСПЫТАНИЯ

В навигацию 2008 года проведены испытания грунтоприемника, целью которых было определить концентрацию водогрунтовой смеси при выполнении капитальных дноуглубительных работ.

Тогда земснаряд работал ямно-траншейным способом на супесчаных грунтах с прослойками глины, на участках, заросших камышом. Основные параметры: длина плавучего рефулера составляла 470 пог. м и берегового пульпопровода 370 пог. м, высота подъема грунта от уровня воды до точки сброса – 4 м, глубина забора грунта – до 12 м; частота вращения двигателя, приводящего в действие грунтовый насос, поддерживалась около 600 об/мин; вакуум – 2,5-3 м в. ст.; давление в нагнетательном грунтопроводе – 30-35 м в. ст.; подача воды на гидрорыхление и гидротранспортирование грунта осуществлялась от двух параллельно работающих насосов марки 4Д315-50а производства Катайского завода и составила 600 м^3/ч при напоре 38 м.

Концентрация водогрунтовой смеси определялась путем отбора в две прозрачные цилиндрические емкости проб на вертикальном участке нагнетательного трубопровода. После отстоя водогрунтовой смеси определялось отношение объема грунта в пробе (высота слоя грунта в цилиндрической емкости) к объему всей пробы водогрунтовой смеси (высоте столба отобранной водогрунтовой смеси). В результате средняя концентрация грунтовой смеси составила 27,7-28%.

По итогам испытаний и на основе опыта последующей эксплуатации были сделаны следующие выводы:

– работа грунтозаборного устройства показала высокую эффективность в плане повышения концентрации водогрунтовой смеси и работе на участках, заросших камышом;

– грунтозаборное устройство данного типа может быть рекомендовано для внедрения и использования на других землесосных снарядах;

– для расширения области применения данного грунтозаборного устройства при использовании землесоса на транзитных работах, при выполнении дноуглубительных работ рекомендуется выполнять расчеты по определению потоков размывающей и грунтотранспортирующей воды гидрорыхлителя.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Патент на полезную модель № 47394 «Грунтозаборное устройство землесосного снаряда» (Авторы Арефьев Н.Н. и Тарасова О.Н.). Опубл. 27.08.2005, Бюл. № 24.
2. Коновалов И.М. Гидромониторные суда. М.: Речиздат, 1941, 188 с.
3. Сизов Г.Н. Работа затопленной мониторной струи. М.: Водтрансиздат, 1953, 168 с.

УЧРЕЖДЕНИЕ: Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

ТЕМА: Исследование работоспособности элементов металлоконструкции портальных кранов с деформационными повреждениями методом магнитного контроля

АВТОРЫ: О.В. ЛЕОНОВА, кандидат технических наук, профессор;
А.Б. ДАРЮХИН, кандидат технических наук, старший преподаватель

АННОТАЦИЯ: В статье даны результаты исследования деформированных элементов металлоконструкций портальных кранов, позволяющие оценить возможность их дальнейшей эксплуатации

В настоящее время для оценки напряженно-деформированного состояния и прогнозирования остаточного ресурса конструкций начинает использоваться неразрушающий магнитный метод, основанный на измерении одного из основных магнитных параметров – коэрцитивной силы (Hc). В данной статье приведены результаты использования этого метода для металлоконструкций портальных кранов.

Коэрцитивная сила Hc [1, 2, 3], представляющая собой напряженность магнитного поля, связана с магнитной энергией и внутренним полем анизотропии. Она определяется тонкой структурой металла и зависит от химического и фазового состава, размера зерна, включений, плотности дислокаций, внутренних напряжений и деформаций. При пластической деформации происходят изменения в кристаллической решетке и уровне структуры, накопление повреждений, что приводит к изменению магнитных характеристик металла, а именно коэрцитивной силы.

Особенно четко это проявляется для разупрочняемых материалов, к которым относятся практически все конструкционные стали, и в частности Ст 3, Ст 20, 9Г2С, для которых коэффициент корреляции магнитных и механических свойств равен 0,85, а значение коэрцитивной силы в состоянии поставки Hc° значительно меньше значения коэрцитивной силы при эксплуатации Hc.

Для сталей типа Ст3 существует линейная зависимость в виде [1, 2, 3]:

$$Hc = Hc^{\circ} + A\varepsilon, \qquad (1)$$

где ε – деформация; Hc° – величина коэрцитивной силы стали в состоянии поставки; A – коэффициент, характерный для каждой марки стали.

Исследования [1, 2, 3], выполненные для сталей Ст3, Ст20, 09Г2С, показали, что, если не достигнуто значение предела текучести после разгрузки, величина Hc остается постоянной, равной исходной Hc°. После перехода в упругопластическую область Hc растет сразу после начала нагружения до величины Hc^T, соответствующей физическому пределу текучести металла σ_T. А после небольшой площадки или зуба текучести продолжает расти до значения Hc^B, при котором происходит разрушение металла. Как видно из рис. 1, накопление остаточной пластической деформации начинается при дости-

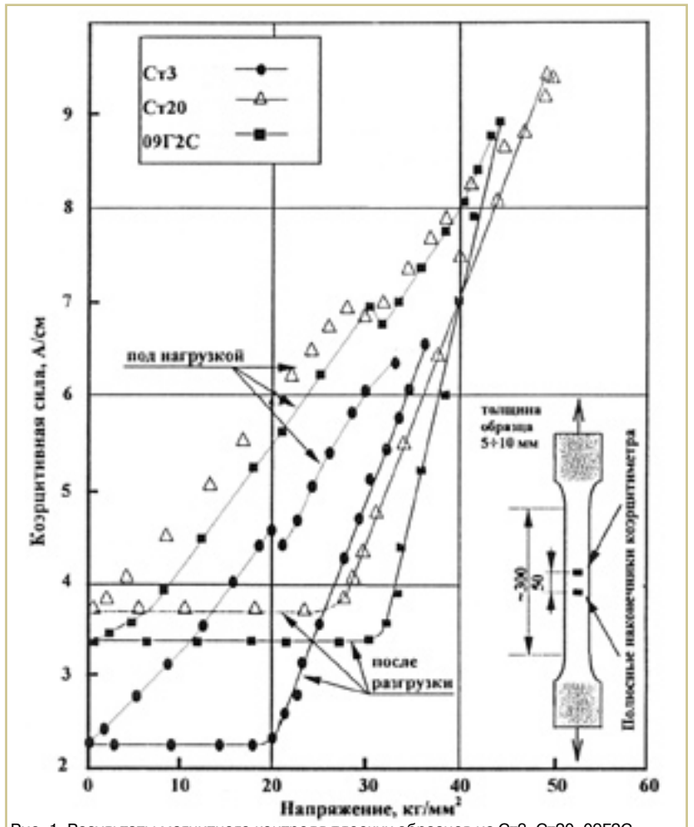

Рис. 1. Результаты магнитного контроля плоских образцов из Ст3, Ст20, 09Г2С при испытаниях на растяжение с регистрацией значений коэрцитиметра непосредственно под нагрузкой и после разгрузки на каждой ступени нагружения

Рис. 2. Общий вид портального крана «Ганц» 5/6-30 тип Е

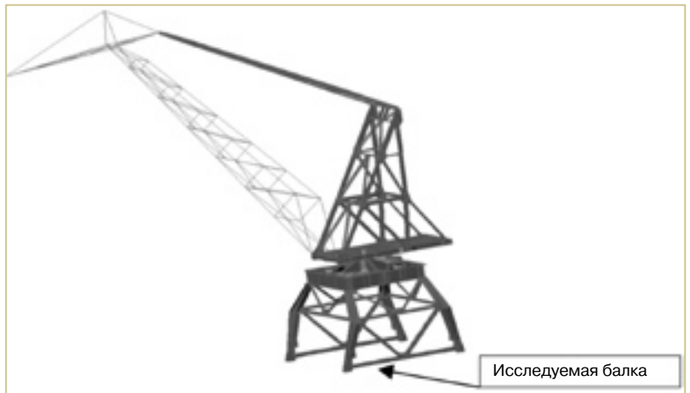

Рис. 3. Общий вид портального крана «Альбрехт»

Рис. 4. Результаты контроля Нс (А/см) с линейной части стяжки ВГ портального крана «Альбрехт»: А (вверху) – в зоне деформации, Б (внизу) – в месте крепления раскосов

жении металлом предела текучести и идет по экспоненциальному закону вплоть до разрушения.

Магнитные свойства стальных металлоконструкций при циклическом нагружении формируются в условиях сложнонапряженного состояния. При этом также идет процесс накопления повреждений и микропластических деформаций, приводящий к потере несущей способности конструкции. Накопление повреждений в структуре металла при усталости также сопровождается ростом Нс, а скорость роста Нс определяется режимом нагружения конструкции [1, 2, 3].

Используя приведенные выше зависимости и графики, нами были исследованы деформированные элементы балок портала портальных кранов «Ганц» 5/6-30 тип Е и «Альбрехт» (рис. 2 и 3). Измерение коэрцитивной силы осуществлялось П-образным преобразователем прибора КРМ–Ц-К-М. Схемы расположения деформированных балок приведены на рисунках 2 и 3.

Измерения коэрцитивной силы в деформированных балках проводились в долевом и поперечном направлениях. В особо ответственных и спорных случаях на одном месте делалось не менее 3 замеров.

Результаты измерений Нс заносились в таблицу (табл. 1 и 2) и на схему (развертку) балки (рис. 4 и 5), строились графики распределения коэрцитивной силы с указанием зон, где Нс достигала наибольшего значения. Максимальные значения $Нс^{MAX}$ сравнивались с критическими значениями $Нс^{C}$ или $Нс^{B}$ для данной марки стали, и делался вывод о напряженно-деформированном состоянии металла.

Было установлено, что остаточные напряжения для балок портального крана «Ганц» 5-30 тип Е не превышают $\sigma_{ост}$=160 МПа, что соответствует максимальному прогибу 100 мм в нижней части балки.

Для портального крана «Альбрехт» максимальные значения Нс, выявленные в раскосе, соответствуют состоянию металла с остаточными напряжениями, превышающими предел текучести стали СтЗ, равный 205 МПа. В горизонтальной балке местные значения Нс также превысили $Нс^{T}$, соответствующее состоянию металла после достижения предела текучести. Уровень максимальных остаточных напряжений составил: в раскосе – 240 МПа, в горизонтальной балке – 270 МПа. Превышения полученных остаточных напряжений до предела текучести СтЗ выявлено в зоне максимальных деформаций. Результаты исследования данных балок свидетельствуют о необходимости проведения их ремонта.

В процессе исследования было проведено сравнение результатов измерений, полученных магнитным методом, с результатами расчетов, выполненных классическими ручным методом и методом конечных элементов с использованием программного комплекса APM Winmachine [4] (табл. 3). Сравнение показало удовлетворительную сходимость результатов.

ВЫВОДЫ:

1. Проведенный магнитный контроль по величине коэрцитивной силы Нс позволил установить уровень остаточных напряжений в деформированных несущих элементах портальных кранов «Ганц» 5/6-30 тип Е и «Альбрехт».

2. Сравнение расчетов напряжений элементов портала портальных кранов в модуле Structure 3D программного комплекса APM WinMachine, ручных расчетов и замеров остаточных напряжений тех же самых элементов магнитным методом неразрушающего

Результаты магнитного контроля остаточных напряжений, измеренных в деформированной горизонтальной стяжке ВГ портального крана «Альбрехт»

Таблица 1

Элемент	t, мм	Нс, (А/см)	$\sigma_{ост}$, вдоль, МПА	$\sigma_{ост}$, поперек, МПА
Опора Г	15	1,3 – 1,5	50	70
Стяжная балка ВГ	10	2,9/2,6	80	50
Зона деформации	10	3,0/2,9	85	80
	10	3,2/3,7	100	140
	10	3,9/3,5	160	120
	10	3,5/3,1	120	85
Стяжная балка ВГ	10	3,4/3,3	80	70
Стяжная балка ВГ	10	2,7/2,5	40	30
Опора В	15	1,2 – 1,4	40	65

Результаты магнитного контроля остаточных напряжений, ресурса и режима эксплуатации по длине деформированных участков элементов портального крана «Ганц» 5/6-30 тип Е

Таблица 2

Элемент		t, мм	Нс, (А/см)	$\sigma_{ост}$, (МПа)
X	1	8	4,2	130
	2	8	4,8	180
	3	8	5,3	240*
	4	8	4,7	170
	5	8	4,5	160
VI	1	8	4,0	120
	2	8	5,2	230*
	3	8	5,7	270*
	4	8	4,5	160
	5	8	3,7	90

Сравнение результатов расчетных напряжений в деформированных балках портала кранов «Ганц» 5/6-30 тип Е с помощью магнитного метода, ручных расчетов и программы APM WinMachine

Портальный кран	Деформированная балка	Магнитный метод	Ручной расчет	Расчеты APM
«Ганц» 5/6-30 тип Е	Балка VI	270 МПа*	224 МПа	220 МПа
«Ганц» 5/6-30 тип Е	Балка X	240 МПа*	157,1 МПа	150 МПа

* Элемент отремонтирован путем приваривания дублирующей балки.

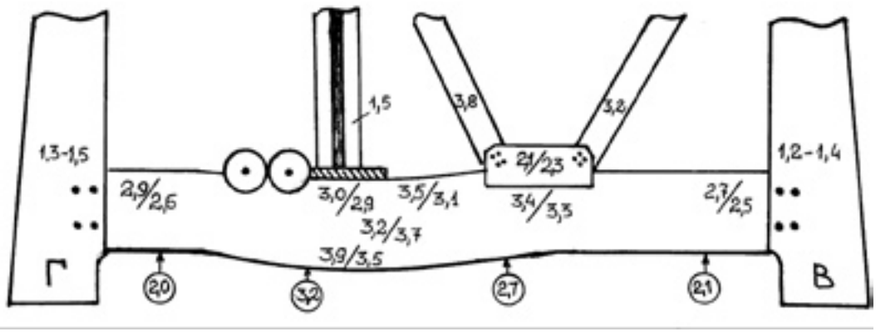

Рис. 5. Распределение Нс (А/см) в нижней горизонтальной стяжке ВГ портального крана «Альбатрос»: в числителе – Нс вдоль балки, в знаменателе – поперек; стрелками показаны Нс по нижнему растянутому поясу

контроля выявило удовлетворительную сходимость результатов.

3. Результаты проведенных экспериментов позволяют рекомендовать метод магнитного контроля по величине коэрцитивной силы для определения остаточных напряжений в деформированных балках металлоконструкций портальных кранов и оценки их работоспособности как точный и оперативный метод оценки величины остаточных напряжений, позволяющий с наименьшими затратами времени давать заключение о возможности эксплуатации той или иной балки и необходимости выполнения их ремонта.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Б.Е. Попов, В.Ф. Мужицкий «Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса металлоконструкций подъемных сооружений». Журнал «Контроль. Диагностика», 1998 г., № 3, стр. 40-45.
2. Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько «Оценка текущего ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин по изменениям коэрцитивной силы». Журнал «Подъемные сооружения. Специальная техника», 2002 г., № 1, стр. 14-17.
3. Б.Е. Попов, В.С. Котельников «Магнитная диагностика и остаточный ресурс», 2001 г., № 2, стр. 44-49.
4. А.Б. Дарюхин, О.В. Леонова «Оценка надежности элементов металлоконструкций с деформационными повреждениями эксплуатационного и монтажного характера». Журнал «Речной транспорт», 2006 г., № 5, стр. 73-75.

УЧРЕЖДЕНИЕ: Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

ТЕМА: Вопросы оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений в портах России

АВТОР: Игорь КОСТИН, кандидат технических наук, доцент

АННОТАЦИЯ: В статье рассматривается ряд вопросов оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений (ГТС) в портах России с учетом их физического износа за время эксплуатации

Известно, что в настоящее время большую долю ГТС в портах Российской Федерации составляют построенные в 50-60-х годах XX века, имеются также и ГТС, построенные еще в дореволюционный период. Вполне естественно, что данные конструкции за время своей эксплуатации претерпели значительный физический, а некоторые и моральный износ. В связи с этим одной из важнейших проблем современного портового гидротехнического строительства является оценка физического износа и эксплуатационной надежности существующих ГТС.

С целью усиления и реконструкции портовых ГТС проектным институтом «Союзморниипроект» в свое время была разработана система обследований и оценки состояния портовых ГТС [1, 2]. В этой системе оценка состояния конструкции производится с помощью коэффициентов сохранности, значения которых зависят от категории дефектов отдельных элементов сооружения. Категории дефектов назначаются с учетом визуально-инструментального обследования конструкции. В соответствии с требованиями РД 31.3.3.97 [1] все дефекты сооружений разделены на три категории:

– 1 категория – малозначительные дефекты, которые не оказывают существенного влияния на работоспособность сооружения;

– 2 категория – значительные дефекты, которые существенно влияют на работоспособность сооружения и его долговечность, но не являются критическими;

– 3 категория – критические дефекты, не позволяющие использовать сооружение по назначению или делающие такое использование недопустимым. К таким дефектам можно отнести:

а) недопустимые изменения пространственного положения элементов сооружения;

б) уменьшение площадей поперечных сечений, что приводит к возникновению недопустимых напряжений в элементах от воздействия нагрузок;

в) излом и недопустимый изгиб элементов;

г) сквозную коррозию элементов;

д) недопустимые изменения прочностных характеристик материалов.

Однако данная методика, основанная на условных показателях, не позволяет определить истинное напряженно-деформированное состояние сооружения при возникновении в его элементах различного рода дефектов.

Анализ разрушений и, что более важно, результатов и способов эксплуатации физически изношенных портовых ГТС показывает, что конструкции, которые по показателям коэффициентов сохранности должны быть выведены из эксплуатации, продолжают работать, но с определенным риском. Чтобы точнее определить этот риск, более важно произвести оценку состояния сооружения не по условным показателям, а по фактическим параметрам напряженно-деформированного состояния конструкции. Реализовать данную идею возможно с помощью проведения поверочных расчетов существующих сооружений, претерпевших физический износ.

Для достижения большей достоверности поверочные расчеты необходимо выполнять для двух основных вариантов:

– вариант проектный (без учета дефектов конструкции, возникших за время ее эксплуатации);

– вариант, учитывающий физический износ конструкции.

По результатам расчета этих вариантов получится, что предполагаемый способ продления срока эксплуатации сооружения будет основываться либо на существующей (претерпевшей физический износ) и отремонтированной конструкции, либо на использовании новой конструкции.

Исходными данными для расчета проектного варианта являются рабочий проект, исполнительная документация и материалы предыдущего технического контроля, если таковые имеются.

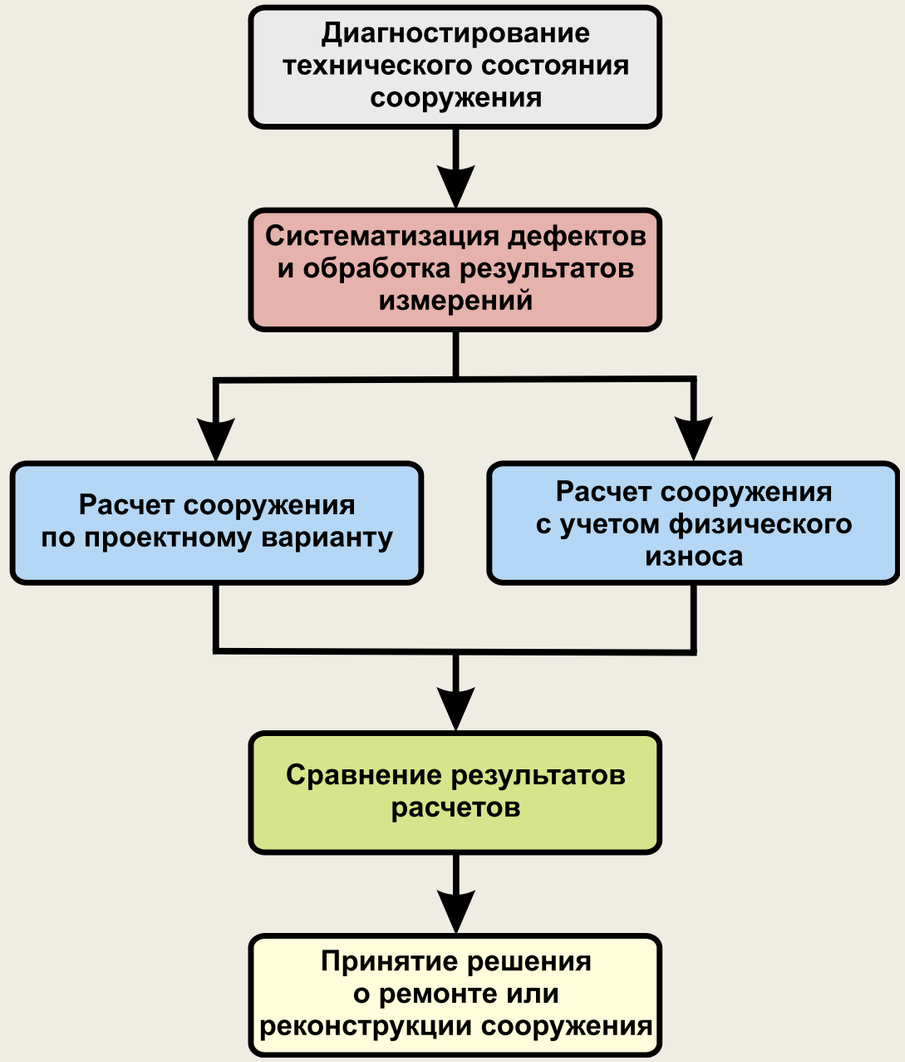

Рис. Порядок проведения поверочных расчетов существующего портового ГТС

Исходными данными для расчета варианта, учитывающего физический износ сооружения, являются данные технического диагностирования конструкции, в которых учтены и систематизированы все дефекты и изменения, произошедшие за время эксплуатации, т. е. расчет ведется с учетом фактических сечений несущих элементов.

Для сравнения несущей способности проектного варианта сооружения и варианта, в котором учтена фактическая несущая способность основных конструктивных элементов, полученная после обследования сооружения, необходимо все значения эксплуатационной нагрузки, геологических условий, размеров и эксплуатационных характеристик судов принимать идентичными.

На основе анализа результатов поверочных расчетов и технико-экономического обоснования ведется разработка предложений по главным научно-практическим вопросам изучаемой проблемы:

1. Режим дальнейшей эксплуатации (вывод из эксплуатации) сооружения.

2. Предложения по усилению или реконструкции сооружения.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно составить блок-схему, отражающую порядок проведения поверочных расчетов существующих портовых ГТС (рис.).

Оценка эксплуатационной надежности выполняется вероятностными методами с учетом статистических данных результатов диагностирования несущих элементов сооружения. При невозможности выполнения оценки в связи с отсутствием или недопустимым ограничением статистической информации о составе материалов конструкции и

ее элементов необходимо выполнить опытную статическую загрузку или проводить статические испытания несущих элементов и узлов.

За основной показатель надежности ГТС принимается вероятность его безотказной работы, то есть вероятность того, что в период эксплуатации сооружения не наступит отказ – предельное состояние первой и (или) второй групп.

Расчет надежности выполняется как для основных несущих элементов, определяющих прочность и устойчивость конструкции, так и для всего сооружения в целом.

Последовательность выполнения расчета эксплуатационной надежности портовых сооружений заключается в следующем:

– структурный анализ взаимодействия и систематизация возможных отказов несущих элементов конструкции;

– составление детерминистических уравнений связи для основных несущих элементов конструкции;

– подготовка базы данных для расчета эксплуатационной надежности портовых ГТС;

– расчет несущих элементов конструкции на надежность.

При структурном анализе взаимодействия несущих элементов конструкция рассматривается как система соединенных элементов трех типов: последовательное; параллельное; последовательное и параллельное соединение несущих элементов. При последовательном соединении надежность конструкции в целом P_S меньше надежности наименее надежного несущего элемента p_j , так как при взаимонезависимости отказов P_S равна произведению надежностей отдельных элементов. Параллельное соединение элементов в системе – такое соединение, когда только выход критического числа элементов из строя ведет к отказу системы. В этом случае при отказе одного элемента нагрузка, приходящаяся на него, передается на другие элементы конструкции. При параллельном соединении надежность системы P_S всегда выше надежности самого надежного элемента. Система с параллельно и последовательно соединенными элементами объединяет параллельные и последовательные способы соединения несущих элементов.

Детерминистическое уравнение связи – это уравнение или алгоритм расчета, устанавливающий функциональную зависимость между показателями нагрузки и прочности или между входными параметрами и результатами расчета (и соответствующие нормам проектирования).

Под базой данных для расчета эксплуатационной надежности понимаются массивы чисел или их обобщающие параметры, характеризующие свойства объектов, нагрузок и воздействий, физико-механических характеристик строительных материалов и грунтов оснований и засыпок, которые служат исходными данными для вероятностных методов расчета.

Для любого момента времени t условие безотказной работы j-го несущего элемента сооружения или основания должно соблюдаться с вероятностью p_j, не ниже нормативного значения P_n.

$$P_j=P(Y_j,t) \geq [P_n] \quad (1)$$

$$\text{при } Y_j=R_j-S_j>0, \quad (2)$$

где Y_j – резерв контролируемого параметра напряженного или деформированного состояния j-го элемента конструкции сооружения, случайная величина (сложная функция случайных аргументов); R_j – показатель прочности j-го несущего элемента сооружения, случайная величина (сложная функция случайных аргументов); S_j – нагрузка на j-й несущий элемент конструкции сооружения, случайная величина (сложная функция случайных аргументов); $[P_n]$ – нормативная вероятность безотказной работы, нормативная надежность.

Математическое ожидание (среднее) и дисперсия для резерва контролируемого параметра (2) определяются через соответствующие характеристики статистически независимых распределений нагрузки и прочности:

$$\bar{Y}_j=\bar{R}_j-\bar{S}_j, \quad (3)$$

$$D_y=D_R+D_S, \quad (4)$$

где $\bar{Y}_j$ – математическое ожидание резерва контролируемого параметра напряженного или деформированного состояния j-го элемента конструкции сооружения; $\bar{R}_j$, $\bar{S}_j$ – математические ожидания соответственно показателя прочности и нагрузки на j-й несущий элемент конструкции сооружения; D_y – дисперсия резерва контролируемого параметра напряженного или деформированного состояния j-го элемента конструкции сооружения; D_R, D_S – дисперсии соответственно показателя прочности и нагрузки на j-й несущий элемент конструкции сооружения.

Гарантия неразрушимости несущих элементов p_j [3]

$$p_j=1-\Phi\left(\frac{\bar{S}_j-\bar{R}_j}{\sqrt{D_S+D_R}}\right), \quad (5)$$

где Ф – функция нормального распределения.

Математическое ожидание функции случайных аргументов равно величине, определенной по детерминистической зависимости при подстановке математических ожиданий случайных аргументов

$$\bar{S}_j=f_S(\bar{S}_{j1};\bar{S}_{j2}\ldots\bar{S}_{jn}), \quad (6)$$

где $\bar{r}_{ji}$, $\bar{s}_{ji}$ – математические ожидания случайных аргументов функций прочности и нагрузки.

Дисперсия функции (прочности или нагрузки) случайных аргументов

$$D_R=\mu_2(R)=\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial f_R}{\partial r_j}\right)^2\mu_2(r_j)+\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial f_R}{\partial r_j}\right)\left(\frac{\partial^2 f_R}{\partial r_j^2}\right)\mu_3(r_j), \quad (7)$$

где μ_2, μ_3 – второй и третий центральные моменты случайных аргументов прочности или нагрузки; n – число случайных аргументов в функции прочности или нагрузки;

$\left(\frac{\partial f_R;\partial f_S}{\partial r_j;\partial S_j}\right);\left(\frac{\partial^2 f_R;\partial^2 f_S}{\partial r_j^2;\partial S_j^2}\right)$ – первая и вторая производные функции случайных аргументов соответственно прочности и нагрузки.

При оценке эксплуатационной надежности существующих портовых ГТС и их остаточного ресурса используются фактические данные степени физического износа несущих элементов сооружения.

При проектировании нового или реконструируемого сооружения учитывается ограниченное число несущих элементов, долговечность которых определяет срок службы всего сооружения. Такие элементы назовем критическими.

Нормативные значения надежности устанавливаются на основе сравнения расчетных методов предельных состояний и теории надежности, а также опыта проектирования ГТС с использованием методов теории надежности и экономических критериев.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. РД 31.3.3-97. Руководство по техническому контролю гидротехнических сооружений морского транспорта. М.: Союзморниипроект, 1997. – 185 с.
2. РД 31.3.4-97. Положение об организации технического контроля гидротехнических сооружений морского транспорта. М.: Союзморниипроект, 1997. – 50 с.
3. Ржаницын А. Р. Проблемы надежности в строительном проектировании. Свердловск, 1972.
4. Костюков В. Д. Надежность морских причалов и их реконструкция. М.: Транспорт, 1987.

УЧРЕЖДЕНИЕ: Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (СПГУВК)

ТЕМА: Оценка погрешности коррелированных навигационных измерений

АВТОРЫ: Анатолий НЫРКОВ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Комплексное обеспечение информационной безопасности»; Аркадий ЧЕРНЕНКО, старший научный сотрудник

АННОТАЦИЯ: В статье предложена формула для оценки погрешностей разности коррелированных измерений навигационных параметров, приведены результаты ее экспериментальной проверки

При решении практических навигационных и гидрографических задач часто вычисляется разность двух однородных измерений навигационных параметров. Под однородными измерениями следует понимать измерения, погрешности которых являются выборкой из одного и того же случайного процесса. Не рассматривая процедур определения однородности навигационных измерений, которые достаточно сложны, отметим, что это, как правило, измерения, выполненные одним и тем же прибором. Помимо участия человека в процессе измерения (измерение пеленгов, дистанций с помощью РЛС и т. п.) их должен выполнять один и тот же наблюдатель. К однородным навигационным измерениям, при соблюдении определенных условий, можно также отнести измерения широты и долготы современными приемниками спутниковых навигационных систем.

Два однородных измерения, выполненных через небольшой промежуток времени, обычно взаимно коррелированны. Пренебрежение этим фактом может привести к неверной оценке погрешности определения приращения навигационного параметра (разности измерений) и, соответственно, к неэффективному решению навигационной задачи.

Получим формулу для вычисления дисперсии разности двух однородных измерений, приняв оговоренные выше условия и представив измеренный навигационный параметр X в виде суммы его истинного значения $X_и$ и гармонических составляющих погрешности, каждая из которых имеет свой случайный фазовый сдвиг ξ_ω, [1]:

$$X(t)=X_u(t)+\int_0^\infty K(\omega)\mathrm{Cos}(\omega t+\xi_\omega)\,d\omega, \quad (1)$$

где: X(t) – значение навигационного параметра, измеренное в момент времени t; $X_и(t)$ – истинное значение измеряемого параметра в момент времени t; $K(\omega)$ – амплитуда гармоники погрешности с угловой частотой ω; ξ_ω – случайный фазовый сдвиг гармоники погрешности с угловой частотой ω.

С учетом формулы (1) приращение величины навигационного параметра $\Delta X(\Delta t)$ за интервал времени Δt запишется в виде:

$$\Delta X(\Delta t)=\Delta X_u(\Delta t)+\int_0^\infty K(\omega)\left[\mathrm{Cos}(\omega t+\xi_\omega+\omega\Delta t)-\mathrm{Cos}(\omega t+\xi_\omega)d\omega\right]. \quad (2)$$

Определим с учетом (2) модуль составляющей погрешности, вносимой в $\Delta X(\Delta t)$ произвольной гармонической составляющей исходных измерений:

$$\left|E(\omega,\Delta t)\right|=K(\omega)\left|\mathrm{Cos}(\omega t+\xi_\omega+\omega\Delta t)-\mathrm{Cos}(\omega t+\xi_\omega)\right|. \quad (3)$$

Или, выражая через произведение синусов [2]:

$$\left|E(\omega,\Delta t)\right|=2K(\omega)\left|\mathrm{Sin}(0{,}5\omega\Delta t)\mathrm{Sin}(\omega t+\xi_\omega+0{,}5\omega\Delta t)\right|. \quad (4)$$

Величина ξ_ω – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $0..2\pi$ [3], поэтому ее можно представить в виде: $\xi_\omega=\zeta_\omega\pm90^\circ-0{,}5\omega\Delta t$. После подстановки этого выражения в формулу (4), получаем:

$$\left|E(\omega,\Delta t)\right|=\left|\mathrm{Sin}(0{,}5\omega\Delta t)2K(\omega)\mathrm{Cos}(\omega t+\xi_\omega)\right|.$$

Таким образом, амплитуда гармоники погрешности разности измерений $K'(\omega)$ связана с амплитудой гармоники погрешности исходных измерений $K(\omega)$ следующим соотношением:

$$K'(\omega)=2K(\omega)\mathrm{Sin}(0{,}5\omega\Delta t). \quad (5)$$

По определению спектральной плотности случайного процесса [4] выражение (5) равносильно тому, что спектральная плотность погрешностей разности измерений $\Phi_{II}(\omega)$ связана со спектральной плотностью погрешностей исходных измерений $\Phi_{xx}(\omega)$:

$$\Phi_{II}(\omega)=4\mathrm{Sin}^2(0{,}5\omega\Delta t)\Phi_{xx}(\omega). \quad (6)$$

Используя выражение (6) и взаимосвязь спектральной плотности случайного процесса с автокорреляционной функцией, получим автокорреляционную функцию погрешностей разности однородных измерений $R_{II}(t)$:

$$R_{II}(t)=\frac{1}{\pi}\int_0^\infty \mathrm{Cos}(\omega t)\Phi_{II}(\omega)d\omega=$$
$$=\frac{1}{\pi}\int_0^\infty 4\mathrm{Sin}(0{,}5\omega\Delta t)\mathrm{Cos}(\omega t)\Phi_{XX}(\omega)d\omega. \quad (7)$$

Применяя тригонометрические формулы для функций половинного аргумента, получаем:

$$R_{II}(t)=2\left(\frac{1}{\pi}\int_0^\infty \mathrm{Cos}(\omega t)\Phi_{XX}(\omega)d\omega-\frac{1}{\pi}\int_0^\infty \mathrm{Cos}(\omega t)\mathrm{Cos}(\omega\Delta t)\Phi_{XX}(\omega)d\omega\right). \quad (8)$$

Учитывая, что при t=0 $D_{xx}=R_{xx}(t=0)$; Cos(0)=1 [4], получаем искомую формулу для вычисления дисперсии разности двух однородных коррелированных измерений:

$$R_{ll}(0)=D_{ll}=2\left(D_{XX}-\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\mathrm{Cos}(\omega t)\Phi_{XX}(\omega)d\omega\right)=$$
$$=2D_{XX}\left[1-\rho_{XX}(\Delta t)\right], \qquad (9)$$

где: D_{xx} – дисперсия исходных измерений; D_{ll} – дисперсия разности измерений; ρ_{xx} – нормированная автокорреляционная функция исходных измерений; Δt – интервал времени меду измерениями.

Формула (9) может показаться хорошо известной. Во многих публикациях по математике и теории вероятностей [1], а также в ПГС-35 (в разделе с описанием вычислений нуля глубин по связи соответственных высот) приведена формула оценки остаточной погрешности линейной регрессии:

$$D'_y=D_y(1-r^2_{xy}), \qquad (10)$$

где: D'_y – дисперсия оценки значения случайной величины Y, определенной по уравнению линейной регрессии случайных величин $Y=A_0+A_1X$; D_y – дисперсия величины Y; r_{xy} – коэффициент корреляции величин X и Y.

Стоит отметить, что зависимость (9) относится к совершенно иной операции со случайными коррелированными величинами. Регрессионный анализ и формула (10) применяются тогда, когда по значениям одной случайной величины оценивают значения другой случайной величины. Формула (9) предназначена для оценки дисперсии разности двух однородных измерений (разности двух значений одного случайного процесса, отстоящих друг от друга на интервал времени Δt), ее нельзя применить к оценке так называемых дифференциальных измерений. Дифференциальные измерения одновременны, то есть $\Delta t=0$, в этом случае формула (9) дает нереальный результат $D_{ll}=0$!, а это неверно. Но по оговоренным ранее условиям для измерений принадлежащих одной реализации случайного процесса при $\Delta t=0$ вычисляемая разность тождественно равна нулю и не имеет дисперсии, то есть не является случайной величиной.

Для проверки достоверности формулы (9) были выполнены наблюдения на приемнике спутниковых навигационных систем GPS Garmin GPS76 (СКП=10..25 м), установленном на геодезическом пункте. В этом случае истинное приращение навигационного параметра (координат) равно нулю. Все величины, входящие в формулу (9), можно рассчитать по хорошо известным формулам для выборок большого объема:

$$M_{XX}\approx M_x=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x_k,\ x'_k=x_k-M_X,\ D_{XX}\approx S_x=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x'^2_k, \qquad (11)$$

$$\rho_{XX}(\Delta t)\approx r_x(m)=\frac{1}{n_m}\sum_{k=1}^{n}x_{k+m}x'_k,\ \Delta t=\Delta t_{min}m, \qquad (12)$$

$$\Delta X(\Delta t)=\Delta X(m)=x_{k+m}-x_k,\ M_{\Delta X}(m)=\frac{1}{1_m}\sum_{k=1}^{n}\Delta x_i(m), \qquad (13)$$

$$\Delta X_i(m)=\Delta X_i(m)-M_{\Delta X}(m),\ S_{\Delta X}(m)=\frac{1}{1_m}\sum_{k=1}^{n}(\Delta X'_i(m))^2, \qquad (14)$$

где: M_x – статистическая оценка математического ожидания параметра X; S_x – статистическая оценка дисперсии параметра X; n, m, k, l, i – целые положительные числа (индексы); Δt_{min} – минимальный интервал времени между измерениями; x – измеренное значение параметра X; x' – центрированное значение измерения параметра X; $\Delta X(m)$ – приращение параметра X за интервал времени $\Delta t=\Delta t_{min}\cdot m$; $\Delta X'(m)$ – центрированное приращение параметра X за интервал времени Δt; $M_{\Delta X}(m)$ – статистическая оценка математического ожидания приращения параметра X за интервал времени Δt; $S_{\Delta X}(m)$ – статистическая оценка дисперсии приращения параметра X за интервал времени Δt.

Для обеспечения однородности измерений они были подвергнуты следующей предварительной обработке:

– из всей совокупности измерений были выбраны непрерывные последовательности с одинаковым числом спутников, использованных для определения места (10 спутников);

– эти последовательности были разбиты на группы, длительностью 30 с;

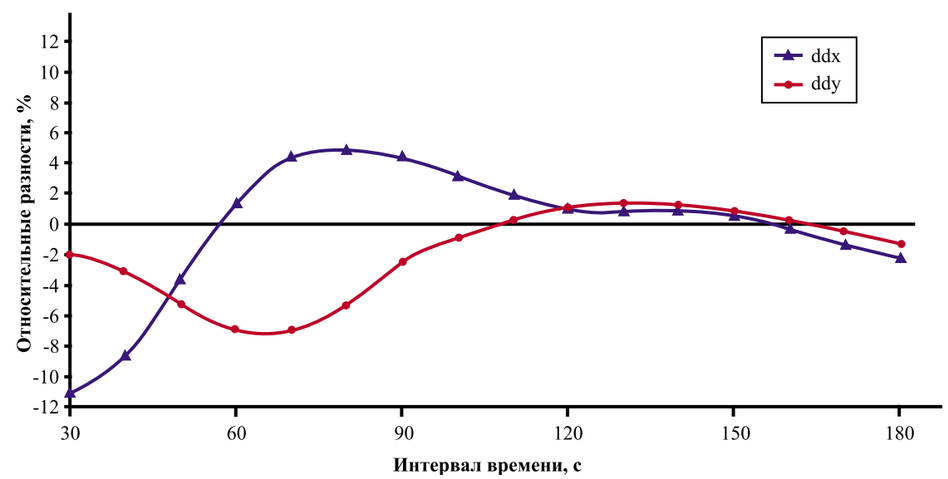

Рис. 1. Относительные разности экспериментальных и теоретических оценок

– из 30-секундных групп составлены непрерывные по времени блоки измерений, в которые по критерию Фишера на уровне значимости 5% вошли группы, имеющие одинаковые дисперсии и математические ожидания.

Для выбранных блоков наблюдений были выполнены расчеты по формулам (11–14) и рассчитаны оценки дисперсий по формуле (9). Кстати, для вычисления оценок по формуле (9) необходимо знать автокорреляционные функции погрешностей исходных измерений. Применение аппроксимаций этих функций внесло бы в результаты проверки дополнительные погрешности, поэтому для вычислений по формуле (9) были использованы значения этих функций, вычисленные по формулам (11-14).

На рис. 1 приведены относительные разности экспериментальных и теоретических оценок ($Ddx=\delta_{dx}$, $Ddy=\delta_{dy}$), вычисленные по формуле:

$$\delta_{d*}=(D'_{d*}-D_{d*})/D_{d*}, \qquad (15)$$

где: δ_{l*} – относительная разность оценок; D'_{d*} – оценки дисперсии, вычисленные по формуле (9); D_{d*} – оценки дисперсии, определенные обычным способом, формулы (11-14).

Как видим, в рассматриваемом интервале времени разность между экспериментальными и теоретическими оценками не превышает 12%. Таким образом, эксперимент подтверждает достоверность формулы (9).

Рассмотрим возможные области применения полученной теоретической зависимости, то есть морские средства навигации и круг задач, решение которых можно сделать более эффективными. В соответствии с Приложением 2 МВР-96 существенная корреляция присуща следующим измерениям:

– расстояний (РНС ГРАС, РЛС, донные маяки, ответчики или «пингеры»);

– разностей расстояний (РНС, РНС «Брас», РС-10, «Марс-75», ДЕККА, ЛОРАН, РСДН-6);

– пеленгов гирокомпасами «Курс», «Маяк» и магнитным компасом.

Зависимость дисперсии приращения навигационного параметра от времени и их автокорреляционной функции можно использовать для определения наилучших режимов измерений. Покажем это на примере определения скорости корабля по расстояниям до берегового ориентира.

Пусть корабль движется по направлению на опорный пункт (или от него), истинный пеленг на ориентир равен истинному курсу корабля, а измерения выполняются некоторой дальномерной системой. В зависимости от свойств РНС автокорреляционная функция ее погрешностей может быть представлена в виде:

$$r_{xx}(\Delta t)=e^{-\alpha\cdot\Delta t}, \qquad (16)$$
$$r_{xx}(\Delta t)=e^{-\alpha\cdot\Delta t}\cdot\cos(\beta\cdot\Delta t), \qquad (17)$$

где: α, β – параметры автокорреляционной функции, имеющие размерность сек $^{-1}$.

Скорость корабля в этом случае определяется по известной формуле [5], применив к которой прием логарифмического дифференцирования, легко получить выражение для дисперсии определения скорости:

$$D_{vv}=V^2\cdot(D_{ll}/L^2+D_{tt}/\Delta t^2)=D_{ll}/\Delta t^2+V^2\cdot D_{tt}/\Delta t^2, \qquad 18)$$

где: D_{vv} – дисперсия определения скорости; D_{ll} – дисперсия определения длины отрезка пути корабля; D_{tt} – дисперсия измерения времени; V – скорость корабля; L – длина отрезка пути корабля; Δt – промежуток времени между измерениями расстояния.

Подставив в формулу (18) формулы (9), (16) и (17), получаем следующие выражения для дисперсий погрешностей определения скорости:

$$D_{vv}=2\cdot D_{xx}\cdot(1-e^{-a\Delta t})/\Delta t^2+V^2\cdot D_{tt}/\Delta t^2, \qquad (19)$$
$$D_{vv}=2\cdot D_{xx}\cdot(1-e^{\alpha\cdot\Delta t}\cdot\cos(\beta\cdot\Delta tt))/\Delta t^2+V^2\cdot D_{tt}/\Delta t^2. \qquad (20)$$

На рис. 2 представлено отношение оценок СКП определения скорости по коррелированным измерениям к оценке по независимым измерениям. Условия проведения измерений соответствуют статьям 12 и 36 ПОМЭК-85.

Оценки дисперсий погрешностей рассчитаны для трех вариантов:

– для независимых погрешностей измерения расстояний [r=0] по формуле (18);

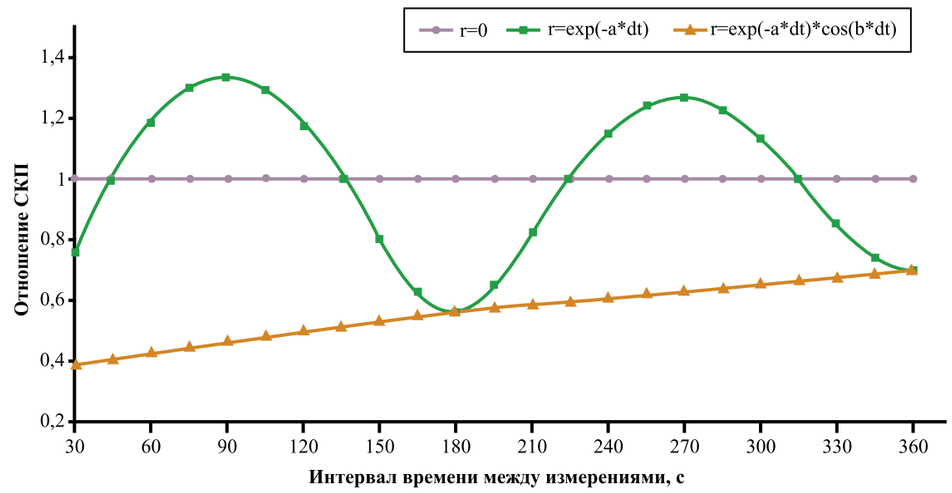

Рис. 2. Отношение оценок СКП определения скорости

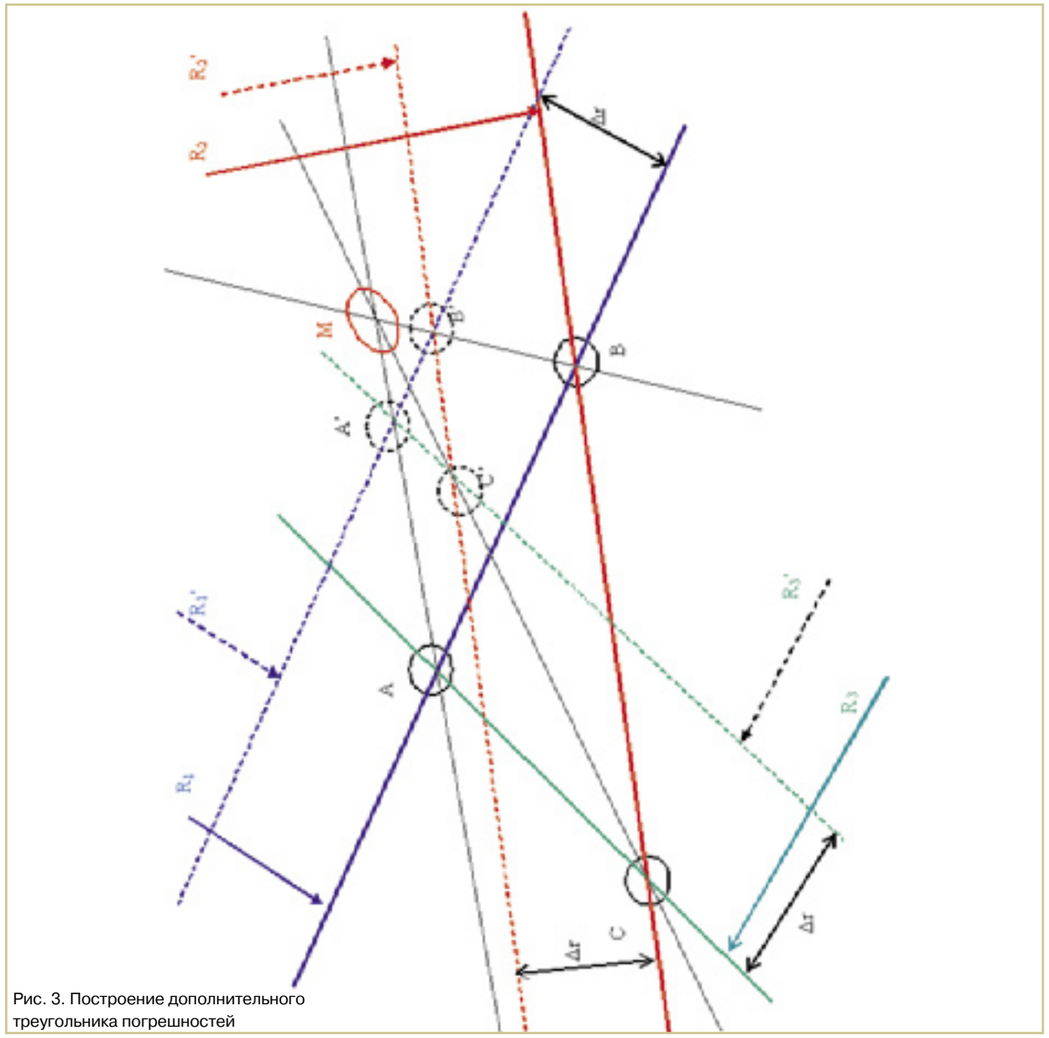

Рис. 3. Построение дополнительного треугольника погрешностей

– для коррелированных однородных измерений с экспоненциальной автокорреляционной функцией [r=exp(-a*dt)] по формуле (19);

– для наблюдений с наиболее часто встречающейся автокорреляционной функцией [r=exp(-a*dt)*cos(b*dt)] по формуле (20).

Из диаграммы на рис. 2 видно, что тип корреляционной функции измерителя расстояний и интервал между измерениями оказывают существенное влияние на точность определения скорости корабля, особенно если автокорреляционная функция погрешностей измерителя имеет периодический множитель. Правильный выбор интервала между измерениями позволяет уменьшить погрешности почти в 1,5 раза. И наоборот – ошибка в выборе интервала между измерениями может увеличить погрешности более чем на 30%.

Полученная формула дисперсии разности измерений позволяет иначе взглянуть и на приемы решения задач по определению места. Так же, как и в предыдущем случае, покажем это на простейшем примере.

Пусть место корабля определяется с помощью РЛС по трем измеренным дистанциям до береговых ориентиров. Измерения выполняются на одной и той же шкале, поэтому зависимостью погрешности измерения от расстояния можно пренебречь. Дисперсия погрешностей измерения расстояний в этом случае постоянна, и процесс измерения можно считать однородным. Пусть в результате измерений получен большой треугольник погрешностей. Если измерения выполнены за период времени существенно меньший интервала корреляции (Δt<48 сек=8 мин/10 [6]), когда коэффициент корреляции больше 0,8, для нахождения места корабля можно использовать широко применявшийся раньше прием, основанный на построении дополнительного треугольника погрешностей (рис. 3).

Отнимем от измеренных расстояний R_1, R_2, R_3, прокладка которых привела к треугольнику погрешностей ABC, одну и ту же произвольную величину Δr. Проложим полученные расстояния R_1', R_2', R_3'. Заметим, что в вершинах исходного треугольника погрешностей ABC и в вершинах нового треугольника A'B'C' соблюдены условия:

$$R_1 - R_2, = R_1 - \Delta r - R_2 + \Delta r = R_1' - R_2' = \Delta_1;$$

$$R_2 - R_3 = R_2' - R_3' = \Delta_2;\ R_3 - R_1 = R_3' - R_1' = \Delta_3.$$

То есть, отрезки AA', BB', CC' – отрезки разностных линий положения. В рассматриваемом случае это разности расстояний Δ_1, Δ_2, Δ_3. Область пересечения этих линий, обозначенная на рис. 3 буквой M, это область, в которой находится наиболее вероятное положение корабля. В соответствии с условиями, оговоренными ранее, и формулой (9) погрешности разностного навигационного параметра существенно ниже погрешностей исходных измерений. Легко рассчитать, что СКП разностей расстояний $\sigma_{\Delta r}$ не превысит 0,63 σ_r исходных измерений. Можно показать, что корреляция между погрешностями в величинах Δ_1, Δ_2, Δ_3 пренебрежимо мала, поэтому дальнейшие действия по определению места и оценке его точности можно выполнять по хорошо известным правилам и методикам для измерений с некоррелированными погрешностями.

Приведенный пример убедительно показывает, что формула расчета дисперсии разности однородных коррелированных измерений (9) позволяет определить допустимость использования способов решения навигационных и гидрографических задач с применением разностных навигационных параметров. В целом ряде случаев использование разностных линий положения, как показывает предлагаемая формула, обеспечивает более высокую точность результатов и существенное сокращение операций по решению навигационных задач. Например, вычисление наиболее вероятного положения по коррелированным измерениям в МВР-96 содержит более 25 расчетных шагов и анализ распределения линий положения по горизонту. Кроме того, он применим только для трех линий положения. Разностные линии положения приводят к конечному результату после обработки измерений обычным методом наименьших квадратов и добавляют всего лишь N операций по определению разностных параметров, где N – число исходных измерений, которое должно быть не менее 3.

ВЫВОДЫ:

1. Теоретически обоснована и экспериментально проверена формула расчета дисперсии разности однородных коррелированных измерений при соблюдении условия равенства дисперсии и автокорреляционных функций для различных выборок измерений.

2. Полученная зависимость позволяет обосновать режимы измерений, обеспечивающих существенное, почти в два раза, уменьшение погрешностей решения навигационных задач.

3. Подход к обоснованию допустимости применения разностных линий положения на основании установления факта однородности погрешностей исходных измерений и оценки их корреляции позволяет определить условия, при которых можно применять упрощенные способы обработки навигационных измерений, повысить точность конечного результата и устранить повторяющуюся часть погрешностей.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М: «НАУКА» 1984. – 832 с.
2. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М: «НАУКА» 1977. – 224 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М: «НАУКА», 1991. – 384 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей – М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 564 с.
5. Правила определения маневренных элементов кораблей военно-морского флота. (ПОМЭК-85). – Л: ГУНиО МО 1987. – 199 с.
6. Методика вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ. (МВР-96) – СПб: ГУНиО МО, 1999. – 217 с.

УЧРЕЖДЕНИЕ: Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (СПГУВК)

ТЕМА: Проблемы и пути обеспечения экологической безопасности судов

АВТОРЫ: А.А. ИВАНЧЕНКО, В.Н. ОКУНЕВ, Ю.В. ТАМБОВСКИЙ

АННОТАЦИЯ: Статья посвящена анализу проблем обеспечения экологической безопасности транспортного флота в отношении загрязнения воздушного бассейна выбросами вредных веществ с отработавшими газами судовых дизелей. Рассмотрены действующие в различных странах мира нормы выбросов, предложены варианты технологий очистки отработавших газов на выпуске из дизельной установки, которые могут быть реализованы на судах

Глобальные проблемы, связанные с загрязнением воздушного бассейна, не оставили без внимания и судоходство. Международная морская организация IMO, начав в 1980 году исследования с изучения проблемы загрязнения воздушной среды в акватории Балтийского моря, на основании полученных результатов в 1986 году приняла решение о распространении своего мандата на охрану воздушного бассейна и в 2000 году представила общественности развернутый текст Приложения VI к Международной конвенции MARPOL 73/78 «Предотвращение загрязнения воздушного бассейна с судов» (далее Приложение VI). Совет министров Европейского экономического сообщества (ЕЭС) на волне полученных шокирующих результатов также принял две директивы 84/360/EC и 88/609/EC, направленные на ограничение вредных выбросов с отработавшими газами (ОГ) промышленных предприятий и судов, в том числе работающих на внутренних водных путях (ВВП). Согласно указанным директивам в

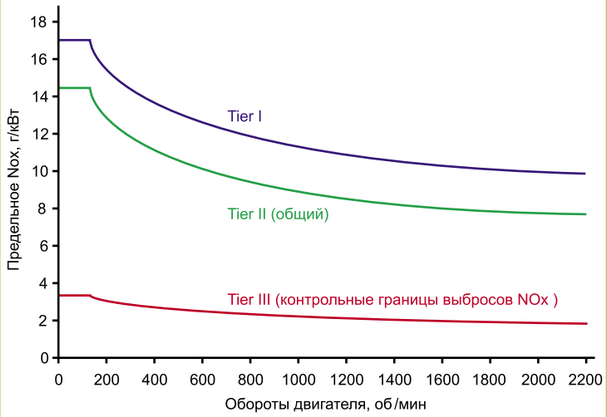

Рис. 1. Нормы выбросов оксидов азота

странах ЕЭС стала обязательной экологическая экспертиза морских и речных портов, в которых обрабатываются суда водоизмещением более 1350 т, а также судовых фарватеров, по которым курсируют суда с указанным водоизмещением.

И хотя Приложение VI в предложенной в 1990 году редакции вступило в силу в мае 2005 года, уже в 2008 году на 57-й сессии Комитета по защите морской среды (MEPC) была вынесена на обсуждение новая редакция, значительно ужесточающая требования к выбросам оксидов азота NOx и оксидов серы SOx, что наглядно продемонстрировано на рис. 1 и 2 соответственно.

На 2011 год планами IMO предусмотрено повсеместное ужесточение норм выбросов оксидов азота до 2-го уровня (Tier II) в пределах от 7,7 до 14,4 г/(кВт · ч) в зависимости от номинальных оборотов двигателя. Однако, уже в 2016 году планируется ужесточение действующих норм на выбросы оксидов азота в зонах контроля эмиссии оксидов азота (NOx Emission Control Area – NECA) до 3-го уровня (Tier III), на 80% более жесткого по отношению к действующим в настоящее время нормам (рис. 1). При этом в зону контроля эмиссии оксидов азота NECA планируется включить и Балтийское море.

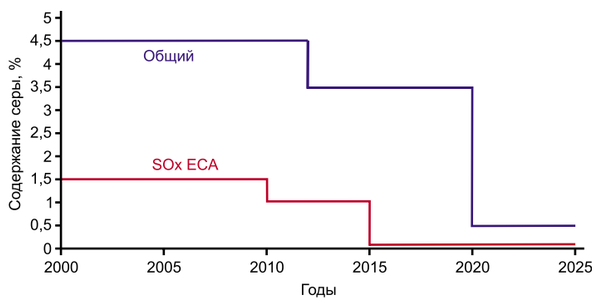

Рис. 2. Нормы выбросов оксидов серы

Более того, в отношении двигателей мощностью 5000 кВт и более, рабочим объемом цилиндра 90 л и более, изготовленных в период с 1990 по 1999 год, принято решение применить с 2011 года стандарт выбросов 1-го уровня (Tier I). Обсуждается также, что стандарт мог бы применяться к тем двигателям, для которых имелась бы сертифицированная система или комплект оборудования для модернизации двигателя (так называемый Kit) с целью достижения показателей стандарта выбросов 1-го уровня (Tier I). С учетом тенденции вывода из эксплуатации двигателей, не соответствующих нормам, было достигнуто соглашение.

В плане применения стандарта 3-го уровня (Tier III) принято решение о целесообразности освобождения прогулочных судов длиной менее 24 м и судов с главными двигателями мощностью менее 750 кВт, когда судно не может соответствовать требованиям вследствие его конструктивных ограничений.

Что касается выбросов оксидов серы с ОГ судовых дизелей, то их уровень в рамках действующих требований Приложения VI лимитируется ограничением содержания серы в любом используемом на судне топливе. Сейчас требование таково, что содержание серы в топливе в произвольном районе плавания не должно превышать 4,5% по массе. В особых районах – зонах контроля эмиссии оксидов серы (SOx Emission Control Area – SECA) содержание серы в топливе должно быть не более 1,5% по массе или на судне должна применяться система очистки ОГ с гарантированным уровнем очистки от выбросов оксидов серы до уровня, не превышающего 6,0 г/(кВт · ч).

В апреле 2008 года на 57-й сессии MEPC при обсуждении предложений по пересмотру Приложения VI был согласован проект поправок к Приложению VI, которые включают следующие ограничения (рис. 2):

1. Содержание серы в топливе за пределами особых районов:
– 4,5 масс.% – до 1 января 2012 года;
– 3,5 масс.% – с 1 января 2012 года;
– 0,5 масс.% – с 1 января 2020 года.

Последнее ограничение введено с оговоркой, что в 2018 году будет проведен анализ достаточности топлива с таким содержанием серы на мировом рынке.

2. В особых районах – зонах SECA (в том числе Балтийское и Северное моря):
– 1,5 масс.% – до 1 марта 2010 года;
– 1,0 масс.% – с 1 марта 2010 года;
– 0,1 масс.% – с 1 января 2015 года.

Что касается национального законодательства, то Постановлением Правительства РФ от 06.02.02 № 83 «О проведении регулярных проверок транспортных и иных передвижных средств на соответствие техническим нормативам выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух» контроль соблюдения технических нормативов на вредные выбросы с ОГ введен начиная с 2004 года. Причем если Российским Морским Регистром Судоходства на суда, находящиеся у него под наблюдением, распространены требования Приложения VI, то Российским Речным Регистром предпринимаются попытки перенести на условия эксплуатации требования ГОСТР 51249-99 и ГОСТР 51250-99, регламентирующих вредные выбросы и дымность ОГ судовых дизелей при их испытаниях на стенде завода-изготовителя и ремонтного предприятия. Сопоставление этих требований с нормами, действующими в США и странах Европы, представленное в табл. 1, показывает, что действующие в России согласно ГОСТР 51249-99 нормы выбросов в целом соответствуют требованиям зарубежных стандартов.

Технические нормативы выбросов вредных веществ для судовых дизелей

Таблица 1

Страна, стандарт, год введения	Нормируемый параметр	Значение нормы, г/(кВт•ч)	Классификационный признак, испытательная процедура
Россия, ГОСТ Р 51249, 2000	E_{NO_x} E_{CO} E_{CH}	9,8-17 3,0 1,0	4–ступенчатые циклы серии Е (ISO 8178 – 4) $E_{NO_x} = f(n)$
Стандарт IMO Techn.code-NOx MEPC 39/1, 1997	E_{NO_x}	9,8-17	4–ступенчатые циклы серии Е (ISO 8178 – 4) $E_{NO_x} = f(n)$
Европа, ЕЕА, Правила безопасности на внутренних водных путях, 2000	E_{NO_x} E_{CO} E_{CH} E_C	9,2-13,0 5,0 1,3 0,54	4–ступенчатые циклы серии Е (ISO 8178 – 4) $E_{NO_x} = f(n)$
США, EPA 64 FR 73300 marine diesel, 1999	E_{NO_x} E_{CO} E_{CH} E_C	11,4 6,2 1,3 0,54	4–ступенчатые циклы серии Е (ISO 8178 – 4)

В связи с этим представляет интерес оценка соответствия уровня выбросов дизелей российского производства действующим требованиям и готовности российских производителей двигателей к выполнению перспективных норм IMO по выбросам оксидов азота.

Из рассмотрения данных табл. 2, в которой представлены уровни выбросов NOx судовыми дизелями российского производства, следует отметить, что выбросы большинства моделей представленных дизелей в целом соответствуют уровню, достигнутому мировыми производителями к 1992 году. Превышение норм не выходит за пределы 10-25% и может быть легко ликвидировано в ходе сертификации [3]. В то же время подавляющее большинство представленных дизелей уже не соответствуют перспективным нормам, запланированным на 2011 год, не говоря уже об ужесточении 2016 года.

При этом необходимо отметить, что, несмотря на достаточно жесткий подход к нормированию, ограничения, положенные в основу Приложения VI и соответствующих национальных стандартов, направлены пока только на решение задач, связанных со снижением глобальных выбросов и кислотных осадков.

Если рассматривать основную задачу нормирования вредных выбросов дизелей с точки зрения обеспечения такого соответствия между количеством вредных веществ, выбрасываемых двигателями эксплуатирующихся судов в единицу времени, и качеством атмосферы в прилегающих к водоему акваториях, в результате которого, после рассеяния и химических превращений этих вредных веществ в атмосфере вместе с выбросами других источников (других транспортных средств, промышленных предприятий, теплоцентралей и котельных), не превышались бы предельно-допустимые концентрации (ПДК) всего спектра выбрасываемых в атмосферу с ОГ вредных веществ, рассматриваемые нормы должны быть ужесточены.

Выполненные в этом плане в СПГУВК исследования свидетельствуют о возможном превышении ПДК оксидов азота в местах скопления судов по их вине до 1,5-20-кратного уровня, в то время как природоохранными органами разрешается превышение фоновых концентраций на величину

Технические характеристики судовых дизелей

Таблица 2

№	Типоразмер	Заводская марка	Pe, кВт	n, мин$^{-1}$	Производитель	NO_x, г/(кВт•ч)	Норма NO_x, г/(кВт•ч)	Персп. норма NOx, г/(кВт•ч)
1	6ЧРН36/45	Г-74	1150	500	РУМО	11,5	13,0	10,5
2	6ЧН32/35	6В32	2460	750	РД	13,2	12,0	10,0
3	12ЧН18/20	М420	736	1550	«Звезда»	9,3	10,3	8,1
4	6ЧНСП18/22	ДРА-300	232	750	«Дальдизель»	9,9	12,0	10,0
5	6ЧНСП18/22	ДРА-600	463	1000	«Дальдизель»	5,9	11,3	9,0
6	8ЧН22/24	6В22	1000	1600	РД	12,2	10,3	8,0
7	6ЧН15/18	3Д6С2	117	1500	«Трансмаш»	13,1	10,4	8,2
8	12ЧН15/18	3КД12НС2	386	1500	«Трансмаш»	8,5	10,4	8,2

порядка 0,1 ПДК [2]. В процессе движения транспортных и пассажирских судов по ВВП степень этого превышения определяется транспортно-планировочными, градостроительными, метеорологическими и другими факторами.

В условиях рассмотренных ограничений и быстрого роста мирового флота, оснащения его высокофорсированными дизелями повышенной оборотности, а также изменения топливного баланса флота в сторону увеличения потребления тяжелых низкокачественных топлив, проблема обеспечения действующих ограничений на выбросы вредных веществ с ОГ судовых двигателей приобрела первостепенное значение для отечественных и зарубежных специалистов.

Для ее решения в настоящее время судовладельцам предлагается:

– использовать только малосернистое топливо;

– установить на судне второй топливный резервуар и, в случае работы в зоне SECA, переключаться с обычного топлива на малосернистое;

– использовать смеси дистиллятов;

– использовать портовое энергоснабжение при стоянке в порту;

– установить систему очистки ОГ.

Последствиями ужесточения норм в отношении выбросов оксидов серы в атмосферу, по различным оценкам специалистов, будут рост спроса на малосернистое топливо вместе с наценкой за малосернистость, ускорение развития технологий очистки ОГ.

На сегодняшний день в различных странах мира разработаны десятки технологий очистки ОГ от оксидов азота, оксида углерода, углеводородов и твердых частиц. Однако из всего их многообразия до стадии промышленного внедрения доведены: каталитическое окисление продуктов неполного сгорания топлива, каталитическое восстановление оксидов азота аммиаком и азотсодержащими соединениями, а также фильтрация газов от частиц. При этом необходимо учитывать, что приоритеты, отдаваемые в судовых системах нейтрализации вредных выбросов дизелей, отличаются от наземных транспортных систем. Если на наземных видах транспорта с дизельными двигателями приоритет отдается очистке ОГ от твердых частиц (сажи) и продуктов неполного сгорания топлива, то в судовых и стационарных – очистке от оксидов азота, определяющих их токсичность на 75-85%.

Имеющийся опыт показывает, что для реализации на судах в настоящее время наиболее разработаны две технологии очистки газов от оксидов азота. Это абсорбционная жидкостная очистка и технология селективного каталитического восстановления NOx аммиаком (СКВ-технология). При этом внедрение абсорбционной очистки на судне создает много дополнительных проблем, связанных с загрязнением водной среды. Несмотря на то что она получила одобрение IMO для очистки ОГ от оксидов серы, ее применение на судах в перспективе предполагается ограничить.

СКВ-технология, хотя и нашла применение на судах, остается до настоящего времени весьма дорогостоящей. Существенную стоимость, как ожидается, также будут иметь устройства очистки газов, в основе работы которых предполагается использовать холодную плазму и электронные пучки.

В этих условиях представляется незаслуженно забытой технология селективного некаталитического восстановления NOx аммиаком или карбамидом (СНКВ-технология). Первые предложения по использованию высокотемпературной селективной некаталитической очистки NOx на судне были высказаны специалистами Швеции в период работы Хельсинкской рабочей группы по вопросам предотвращения загрязнения морской среды в августе 1990 года, однако они не получили дальнейшего развития.

Позже, в 2003 году, в работе [1] были проведены экспериментальные исследования опытного нейтрализатора оксидов азота, реализующего СНКВ-технологию без дополнительного подогрева ОГ. В качестве восстановителя применялся водный раствор карбамида, а для повышения эффективности очистки была реализована рециркуляция ОГ в нейтрализаторе. Однако, несмотря на то что в устройстве аналогичного типа, исследованном в работе [4], эффективность очистки была заявлена на уровне 90%, автором работы [1] была достигнута эффективность очистки не выше 55%. Последнее свидетельствует о необходимости совершенствования методов проектирования устройств, реализующих указанную технологию, с целью обеспечения не только действующих, но и перспективных норм выбросов оксидов азота [1, 4, 5]. В настоящее время работы по исследованию подобных методов ведутся в СПГУВК.

Мировое сообщество не стоит на месте. На 59-й сессии MEPC, которая проходила в июле 2009 года в штаб-квартире IMO в Лондоне, одним из наиболее значимых вопросов повестки дня был вопрос о предотвращении загрязнения атмосферы с судов не только оксидами азота и серы, но и выбросами парниковых газов.

В ходе рассмотрения технических и эксплуатационных мер по снижению выбросов парниковых газов с судов было проведено обсуждение вопросов расчета конструктивного индекса энергетической эффективности и ее эксплуатационного критерия, а также ее судового плана.

Вопрос разработки возможных рыночных механизмов, например создание международного фонда по выбросам парниковых газов с судов или введение международной торговли квотами на выбросы парниковых газов с судов, был рассмотрен в общем, концептуальном плане. Достигнуто соглашение, что дальнейшее, более детальное обсуждение будет продолжено в ходе работы 60-й (март 2010 года) и 61-й (октябрь 2010 года) сессий MEPC. По предложению председателя MEPC составлен и согласован план проведения такой работы.

Таким образом, проблемы улучшения эффективных и экологических показателей дизельных установок судов, систем очистки ОГ от вредных примесей были и остаются на ближайшую перспективу самыми актуальными.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Авдевин Д.Е. Повышение экологической безопасности дизельных установок судов выбором рациональной технологии нейтрализации оксидов азота в отработавших газах. Дисс. на соиск. уч.степ. к. т. н. – СПб.: СПГУВК, 2003.
2. Иванченко А.А., Тузов Л.В., Ганчурин В.А. Загрязнение воздушного бассейна в местах скопления флота отработавшими газами судовых дизельных установок. // Сб. научных трудов СПГУВК. – 1996, с. 226–259.
3. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. – 2002, № 2, 24–30 с.
4. Салова Т.Ю. Улучшение эксплуатационных показателей дизельных энергоустановок путем совершенствования смесеобразования и нейтрализации отработавших газов // Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н., СПб – Пушкин, 1999, 42 с.
5. Ходаков Ю.С. Оксиды азота и теплоэнергетика. Проблемы и решения. М.: ООО "ЭСТ-М", 2001. – 416 с.
6. Robin Meech. The Impact of Sulfur Emission Legislation. Trading and Bunkering in the Southern Region, Novorossiysk-Souchi, 24 March, 2006.
7. Tommy Johnsen. Future maritime sulphur reduction regulations. 27th International Bunker Conference, 28 April, 2006.

УЧРЕЖДЕНИЕ: Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (СПГУВК)

ТЕМА: Целевая функция в задачах синтеза судовых и береговых электромеханических систем

АВТОРЫ: А. В. САУШЕВ, кандидат технических наук, доцент; В. А. ШОШМИН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода и электрооборудования береговых установок

АННОТАЦИЯ: В статье рассматриваются вопросы выбора целевой функции при решении задач синтеза разнообразных электромеханических систем водного транспорта. Показано, что для этих систем важнейшей целевой функцией является запас работоспособности, который характеризует вероятность безотказной работы и определяет степень приближения вектора фактического состояния к его предельно допустимому значению

В процессе проектирования и настройки разнообразных электромеханических систем (ЭМС) водного транспорта применяется структурный и параметрический синтезы. При этом первый обычно сводится к выбору варианта системы, а второй предполагает решение двух основных задач – определение номинальных значений внутренних параметров и допустимых пределов их изменения. К внутренним параметрам относятся переменные состояния и первичные данные (постоянные времени, коэффициенты усиления динамических звеньев их систем управления), а также характеристики силовых элементов (индуктивности обмоток, коэффициенты жесткости упругих связей и т. п.). Поскольку эффективность работы любой ЭМС определяется, как правило, не одним, а несколькими показателями качества, то решение этих задач необходимо вести в условиях многокритериальности. К сожалению, методологические аспекты их решения еще находятся в стадии разработки.

В общем случае процесс функционирования любой ЭМС во времени может быть формально описан в виде оператора F_S, который преобразует независимые переменные U, V, X, Z в зависимые переменные Y в соответствии с соотношениями вида:

$$Y(t) = FS(U, V, X, Z, t).$$

Здесь U, V, X, Z – соответственно векторы управляющих входных, возмущающих воздействий, первичных параметров ЭМС и их переменных состояния, Y(t) – вектор выходных переменных, к которым относятся функциональные показатели, характеризующие назначение системы, а также показатели параметрической надежности и экономичности.

Рассмотрим методологию выбора целевой функции при синтезе ЭМС водного транспорта. Базисом предлагаемого подхода (рис. 1) является аксиоматический принцип.

Постулат 1. Основополагающим постулатом методологии является констатация того факта, что любая ЭМС характеризуется двумя обобщенными параметрами – эффективностью (полезностью) и затратами (платой за полезность). Введенный постулат логически вытекает из фундаментального философского закона диалектического единства противоположных начал любого объекта познания. Следствиями постулата являются формулировки двух критериев оценки ЭМС – эффективности (Э) и цены (Ц). Критерий цены (КЦ) характеризует ЭМС значением параметра Ц при фиксированном значении параметра Э, а критерий эффективности (КЭ) – значением параметра Э при фиксированном значении параметра Ц.

Постулат 2. Обобщенные параметры ЭМС могут быть представлены в виде функциональных зависимостей от ее внешних (выходных) и ресурсных параметров: $Э = Э(Y_1, \ldots, Y_j, \ldots Y_m)$, $Ц = Ц(\chi_1, \ldots, \chi_j, \ldots, \chi_k)$. При этом под ресурсными параметрами понимаются такие параметры системы, которые характеризуют потребление различных ресурсов при ее создании и эксплуатации. Они определяют величину затрат на систему, обозначенных обобщенным параметром Ц.

Постулат 3. Два варианта решения задачи параметрического синтеза полагаются равноэффективными ($Э' = Э''$) тогда, когда равны попарно их соответствующие внешние параметры ($Y_j' = Y_j''$). На основе постулата 3 функция $Э = Э(Y_1, \ldots, Y_j, \ldots Y_m)$ конкретизируется в форме вектора.

Постулат 4. Ресурсы ЭМС тождественны товарам. Причем любой товар, как экономическая категория, принципиально имеет цену, и она может быть установлена. Следствием постулата является конкретизация функции $Ц = Ц(\chi_1, \ldots, \chi_j, \ldots, \chi_k)$ в форме:

$$Ц = \sum_{s=1}^{k} b_s \chi_s,$$

где b_s – стоимость (цена) единицы ресурса (товара) χ_s.

Следует заметить, что полученная формула записи функции цены по своей сути принципиально отличается от похожей по форме аддитивной функции записи обобщенного показателя качества, которую вводят с целью скаляризации векторной оценки системы [1].

Задача оптимизации критерия цены (ОКЦ) налагает на обобщенный параметр Э условие Э=const. Единственно возможным способом удовлетворить это требование является фиксирование всех выходных параметров ЭМС. При этом эффективность можно записать в следующей форме:

$$Э = (Y_j = \text{const}), \quad j = \overline{1,m}. \qquad (1)$$

Задание таких фиксированных значений есть не что иное, как определение вполне конкретных, фиксированных потребительских свойств системы. Таким образом, в (1) отображены требования потребителя и преследуемая им цель. При этом выражение (1) и, следовательно, методология оптимизации инвариантны относительно величины фиксированного значения цели системы и определяют лишь форму ее

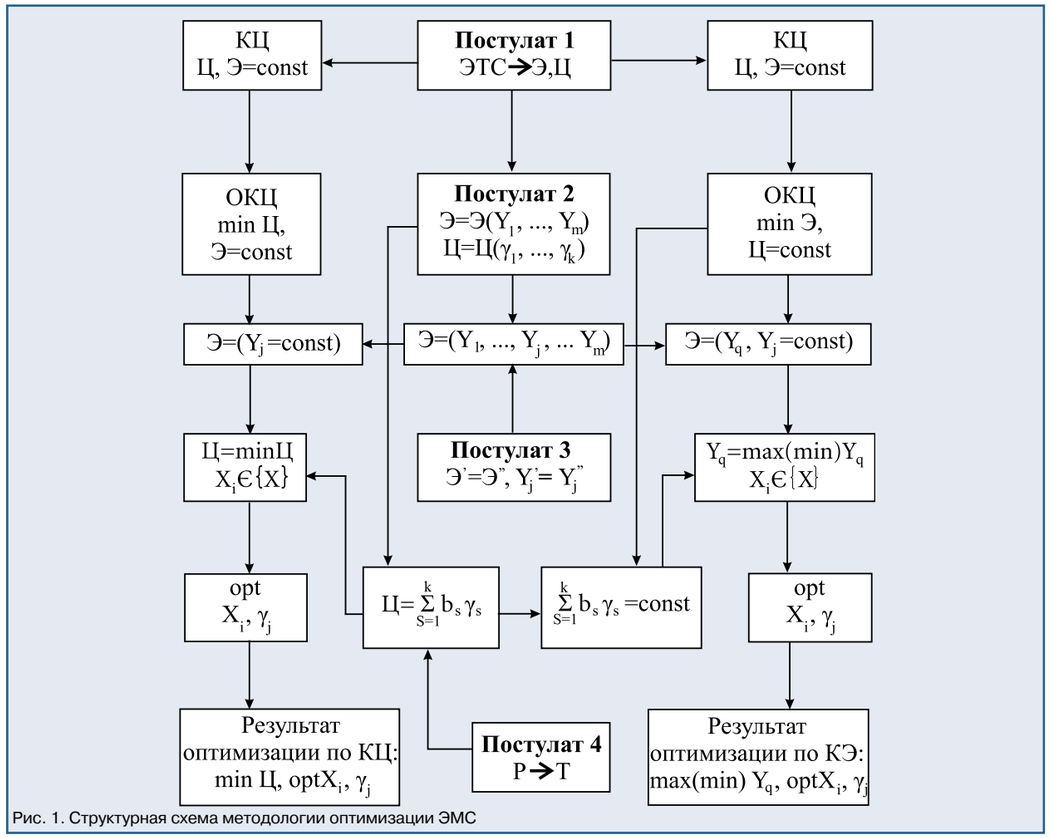

Рис. 1. Структурная схема методологии оптимизации ЭМС

задания. Именно в логическом обосновании формы задания цели системы состоит истинный смысл и значение выражения (1). Тем самым запрещается любой произвол в этом отношении.

Задача оптимизации критерия эффективности (ОКЭ) предполагает нахождение его максимума. Но Э – вектор, а операция оптимизации вектора не имеет смысла. Единственным логически возможным способом разрешения этого противоречия является фиксация всех компонент вектора, кроме одного, который и подлежит максимизации. В этом случае обобщенный параметр Э приобретает форму:

$$Э=(Y_q, Y_j=const),\ \ j=\overline{1,m},\ j\neq q, \qquad (2)$$

где q – нефиксированный выходной параметр ЭМС.

Выражение (2) накладывает на параметр Y_j, $j\neq q$ только требование фиксированности, но оставляет полную свободу в выборе конкретных фиксированных значений. В частности, тем самым разрешается итерационный процесс оптимизации и его реализация в виде человеко-машинных диалоговых процедур.

Анализ литературных источников показывает, что для большинства ЭМС водного транспорта на первое место выдвигается требование высокой надежности. При этом вследствие существенного влияния на работоспособность ЭМС внешних факторов (температуры окружающей среды, влажности, вибрации и др.), особую актуальность приобретает требование обеспечения параметрической надежности.

Применительно к решаемым задачам это означает, что в качестве параметра Y_q целесообразно выбрать вероятность безотказной работы или запас работоспособности системы. Непосредственное использование важнейшего показателя параметрической надежности (вероятности безотказной работы) в качестве целевой функции при оптимизации внутренних параметров системы не всегда эффективно вследствие его малой чувствительности [2] вдали от границ области работоспособности и большой трудоемкости вычислений. Кроме того, при отсутствии статистических данных о распределении параметров элементов ЭМС, вероятность безотказной работы принципиально не может являться целевой функцией.

В качестве целевой функцией при решении задач параметрического синтеза ЭМС в работе предлагается использовать запас работоспособности $\lambda(X)$ [2,3] или $\min\lambda_i(X)$, где:

$$\lambda_i(Xi) = (X_{iн} - X_{inp})/\delta_i(X),\ \ i=\overline{1,n}; \qquad (3)$$

X_{inp} – предельное (максимальное X_{imax} или минимальное X_{imin}) допустимое значение параметра; X_i, $\delta_i(X) = X_{iн} - X_{Pi}$, $\delta_i(X)>0$, $i=\overline{1,n}$ – параметр нормировки, характеризующий меру рассеяния параметра X_i; X_{Pi} – квантиль уровня $P\approx 0$ распределения i-го первичного параметра., т.е.:

$$P = P\{X_i(t) \le X_{Pi}\} = \int_{-\infty}^{X_{Pi}} \Phi_i(X)dX, \qquad (4)$$

где $\Phi_i(X)$ – плотность распределения параметра X_i.

Доказано [3], что в области работоспособности вероятность $P_i(X)$ обеспечения i-го допускового условия является неубывающей монотонной функцией запаса работоспособности $\lambda_i(X)$ и $\max_{X\in G} P_i(X) = P_i(\lambda_i(X_0))$, где $\lambda_i(X_0) = \max_{X\in G} \lambda_i(X)$.

Таким образом, для разных законов распределения выходных параметров, максимизация минимального запаса работоспособности дает близкую к максимальной вероятность безотказной работы системы.

Показателем параметрической надежности при ограниченных статистических данных о законах распределения первичных параметров ЭМС во времени является запас работоспособности, под которым в этом случае понимается степень приближения вектора $\overline{X}t$ фактического состояния ЭМС к его предельно допустимому значению $\overline{X}_\Gamma$ [2]. Множество предельно допустимых значений вектора $\overline{X}_\Gamma$ определяется границей области работоспособности G, а степень приближения вектора $\overline{X}t$ – расстоянием от его конца до ближайшей граничной точки этой области.

Конфигурация области G определяется условиями работоспособности ЭМС, которые в общем случае имеют вид [2, 4]:

$$Y_{jmin} \le Y_j = F_j(X) \le Y_{jmax},\ \ j=\overline{1,m},$$
$$Z^v_{jmin} \le Z^v_j = F^v_j(X) \le Z^v_{jmax},\ \ X_{imin} \le X_i \le X_{imax},\ \ i=\overline{1,n}, \qquad (5)$$

где Y_{jmax} (Z_{jmax}^v), Y_{jmin} (Z_{jmin}^v), Y_j (Z_j^v) – соответственно максимально и минимально допустимое и текущее значения j-го выходного (внутреннего) параметра.

Решение, получаемое по предлагаемому алгоритму, является единственным и в максимальной степени обеспечивает выполнение всех условий работоспособности. При этом автоматически учитываются показатели назначения ЭМС, стоимость ее изготовления и, кроме того, чувствительность и возможные уходы выходных параметров, связанные с вариациями характеристик комплектующих элементов в процессе изготовления, хранения и эксплуатации системы.

При структурном синтезе выбирается такой вариант решения, который характеризуется наибольшим запасом работоспособности.

Стоит отметить, что для некоторых ЭМС в силу специфики их работы в качестве целевой функции может быть выбран не запас работоспособности $\lambda(X)$ или его минимальное значение $\lambda_i(X)$, а какой-либо показатель назначения. Однако при этом одним из критериев, на которые накладываются ограничения, обязательно должен быть требуемый уровень запаса работоспособности.

Предложенный авторами подход был успешно реализован при синтезе разнообразных судовых и береговых ЭМС.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Саушев, А. В., Шошмин В.А. Основы инженерного проектирования электротехнических устройств и систем: СПб.: ЛИВТ, 1993. – 125 с.
2. Саушев А.В. Методы управления состоянием электротехнических систем: СПб.: СПГУВК, 2004. – 126 с.
3. Саушев А.В., Шошмин В.А. Целевая функция в задачах параметрического синтеза электротехнических систем: Информационные системы на транспорте: Сборник научных трудов РАТ – СПб.: Судостроение, 2002. – с. 251-256.
4. Саушев А.В. Метод построения границы области работоспособности электротехнических объектов // Электричество. 1990. № 4 – с. 14-19.

УЧРЕЖДЕНИЕ: Волжская государственная академия водного транспорта (ВГАВТ)

ТЕМА: Методика определения расположения потенциальных источников разлива нефти и нефтепродуктов на внутренних водных путях при эксплуатации судов

АВТОРЫ: В.С. НАУМОВ, доктор технических наук, профессор, академик РАТ; А.Н. БОРОДИН, аспирант

АННОТАЦИЯ: В статье предлагается методика, позволяющая определить расположение потенциальных источников разлива нефти и нефтепродуктов на внутренних водных путях (ВВП) при эксплуатации судов с учетом вероятностного характера протекаемых процессов

В настоящее время в Российской Федерации наблюдается тенденция роста чрезвычайных ситуаций, связанных с авариями судов на ВВП, что обусловлено увеличением промышленного производства и транспортной активности. При этом наибольший ущерб окружающей среде (ОС) наносится в случаях, сопровождающихся разливами нефти и нефтепродуктов (ЧС (Н).

Для снижения негативных последствий необходимо своевременно локализовать разлившуюся нефть, удалить ее и утилизировать. Успешное решение этой задачи природопользователями, хозяйственная деятельность которых может привести к возникновению ЧС (Н), связана с разработкой специальных планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти. Наиболее важным пунктом таких планов является прогноз распространения нефтяного пятна вдоль водного пути, который выполняется на основе иммитационного моделирования. Одним из основных параметров моделирования, определяющих распространение нефтяного пятна и величину ущерба ОС, является координата вероятного возникновения аварийного разлива нефти. При этом наибольшее затруднение вызывает решение данной задачи применительно к движущимся судам.

Анализ работ в затронутой сфере показал, что на данный момент существует методика определения критерия концентрации транспортных происшествий (ТП) при движении судов. Она позволяет классифицировать участки концентрации ТП по степени аварийности [1], но не дает возможности

Рис. Алгоритм определения местоположения источников разлива

определения координаты вероятного возникновения аварийного разлива нефти. В связи с тем, что участки концентрации ТП имеют протяженность от 3 до 20 км, то даже при использовании середины участка в качестве источника разлива ошибка прогнозирования распространения нефтяного пятна может составить несколько километров, что приведет к неправильному определению рубежа локализации и, соответственно, к увеличению ущерба, наносимого ОС.

Определение местоположения потенциального источника разлива нефти также осложняется тем, что координата ТП является случайной величиной, поэтому для создания методики определения расположения потенциальных источников разливов нефти и нефтепродуктов на ВВП при эксплуатации судов необходимо использование подхода с учетом вероятностного характера протекаемых процессов. Методика включает в себя несколько взаимосвязанных этапов (рис.).

Границы участка повышенной концентрации ТП определяются следующим образом:

– начало j-го участка концентрации ТП $l_{j\,нач}$ определяется при условии:

$$k_{icp} \geq K_y; \quad (1)$$

– конец j-го участка концентрации ТП $l_{j\,кон}$ определяется при условии:

$$k_{icp} < K_y, \quad (2)$$

где k_{icp} – усредненное значение плотности аварийности ТП на i-м километре водного пути; K_y – плотность аварийности на характерном участке водного пути.

При этом под плотностью аварийности на участке понимается отношение количества ТП на этом участке к его протяженности [1]:

$$K_y = \frac{N_y}{L_y}, \quad (3)$$

где N_y – количество транспортных происшествий на участке, L_y – протяженность участка, км.

Известно, что характерными участками водного пути являются [1]: речной, озерно-речной, озерный, а также участок гидросооружений.

Для определения усредненных значений плотности аварийности ТП k_{icp} наиболее целесообразно применять метод «скользящей средней», позволяющий исключить резкие колебания значений ТП на каждом километре водного пути [2].

Анализ распределения вероятности ТП внутри участков их концентрации показывает, что это распределение представляет собой многомодальный процесс. Поэтому для определения потенциальных источников разлива нефти необходимо выполнить разбиение участков концентрации ТП на участки аварийности с одномодальным случайным процессом, для которого выполняется нормальный закон распределения случайной величины. При этом в качестве случайной величины принимается километр водного пути, на котором зарегистрировано ТП.

Разбиение участков концентрации ТП на участки аварийности производится с использованием следующих условий:

– для начала ζ-го участка аварийности $l_{\zeta нач}$:

$$k_{icp} \geq \gamma K_y; \quad (4)$$

– для конца ζ-го участка аварийности $l_{\zeta кон}$:

$$k_{icp} < \gamma K_y, \quad (5)$$

где γ – коэффициент, учитывающий повышение плотности аварийности на характерном участке.

Границы участка аварийности находятся путем последовательного увеличения коэффициента γ, начиная со значения $\gamma=1$ (при этом участок аварийности совпадает с участком концентрации ТП). Процедура выполняется до тех пор, пока на полученных участках не будет подтверждаться гипотеза о нормальном распределении случайной величины.

Местоположение потенциального источника разлива нефти определяется как математическое ожидание координаты ТП в границах участка аварийности [3]:

$$M(L) = \sum_{i=l_{\zeta нач}}^{l_{\zeta кон}} l_i \cdot p_i, \text{ км}, \quad (6)$$

где l_i – i-й километр водного пути, где произошло ТП; p_i – вероятность возникновения ТП на i-м километре водного пути:

$$p_i = \frac{n_i}{n_\zeta}, \quad (7)$$

где n_i – количество ТП на i-м километре водного пути; n_ζ – количество ТП на ζ-м участке аварийности, i – километр водного пути (принимает значение в интервале $l_{\zeta нач}$:$l_{\zeta кон}$).

Участки концентрации транспортных происшествий на реке Ока Таблица 1

№ участка	Расположение участка концентрации ТП (км) реки Ока	Протяженность участка, км	Количество случаев
1	3-14	12	10
2	18-22	5	4
3	27-32	6	3
4	35-47	13	10
5	53-58	6	4
6	75-77	3	2
7	101-105	5	3
8	109-120	12	6
9	183-187	5	3
10	195-199	5	2
11	212-224	13	6
12	239-247	9	10

ПРИМЕР РАСЧЕТА

В качестве примера предлагаемой выше методики определим расположение потенциальных источников разлива нефти и нефтепродуктов на реке Ока на участке Нижний Новгород – Касимов (1-409 км).

Для построения диаграммы распределения транспортных происшествий на реке Ока были собраны статистические данные за 29 лет (с 1980 по 2008 год). Река (1-409 км) по гидрологической характеристике и судоходным условиям относится к речному участку. Поэтому на следующем этапе определяем плотность аварийности. На выбранной территории за весь период произошло N = 86 транспортных происшествий. Общая длина участка L = 409 км.

Плотность аварийности определяем по формуле (3):

$$K_{Ока} = \frac{86}{409} = 0{,}21.$$

Далее выполняем усреднение значений плотности аварийности транспортных происшествий на каждом километре реки kicp методом сглаживания с использованием пятичленной «скользящей средней».

Границы участков концентрации ТП на реке Ока, согласно методике, находим при следующих условиях:

– начало участка: $k_{icp} \geq 0{,}21$;

– конец участка: $k_{icp} < 0{,}21$.

На участке существует 12 участков концентрации ТП, удовлетворяющих данным условиям, дислокация которых указана в таблице 1.

Далее проводим проверку гипотезы о нормальности распределения ТП на участках их концентрации, где количество случаев удовлетворяет стандарту необходимого объема выборки $8 \leq n \leq 50$ [3].

На участке № 4 (35-47 км) распределение исследуемой случайной величины отличается от нормального, что свидетельствует о существовании, как минимум, двух участков аварийности. После разбиения участка, согласно методике, получим два участка аварийности с координатами 35-41 и 42-47 км.

Следующим шагом определяем границы участков аварийности и расположение источников разлива с применением компьютерной программы STATISTICA 6.0. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таким образом, предложенная методика позволяет определить расположение потенциальных источников разлива нефти и нефтепродуктов при эксплуатации судов, что делает возможным дальнейшее прогнозирование движения нефтяного пятна по водному пути для определения местоположения рубежа его локализации.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Булгаков С.П., Дудоладов А.А., Тройнов О.С. Анализ аварийных случаев, связанных с применением методов судовождения на внутренних водных путях ЕГС РСФСР / Науч.-техн. информ. сб./ЦБНТИ РТ. – 1991. – Вып. 7. – С.10-21.
2. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики, Москва «Финансы и кредит» 2006. – 656 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. «Высшая школа», 1977. – 479 с.

Границы участков аварийности и расположения источников разлива нефти и нефтепродуктов Таблица 2

№ участка	Граница участка аварийности (км) реки Ока	Источник разлива (км)
1	6,4-10,8	8,6
2	17,8-22,0	19,9
3	28,3-30,7	29,5
4	36,3-41,8	39,1
5	44,6-45,8	45,2
6	52,8-57,3	55,0
7	193,4-197,7	195,5
8	99,5-107,1	103,3
9	110,5-118,3	114,4
10	183,1-188,1	185,6
11	63,3-88,7	76,0
12	213,2-221,5	217,3
13	241,7-243,6	242,7

УЧРЕЖДЕНИЕ: Северо-Двинское государственное бассейновое управление водных путей и судоходства («Севводпуть»)

ТЕМА: Гидравлический расчет Рубежско-Коптельского узла р. Северная Двина на основе технологий многоцелевых программных пакетов

АВТОРЫ: Д.В. ДМИТРИЕНКО, Л.С. ПЕРВУШИН, В.Г. ШМЫКОВ

АННОТАЦИЯ: В статье описаны разработанные авторами математическая модель и программа для выполнения гидравлических расчетов на водных коммуникациях Северного бассейна. Приведен расчет расходов в рукавах на участке Рубежско-Коптельского узла с использованием технологий многоцелевого программного пакета MatLAB

Развитие информационной сферы, оснащение предприятия современными техническими средствами позволяют на качественно новом уровне решать наиболее наукоемкие задачи по совершенствованию технологических процессов и принимать обоснованные решения, используя процедуры формализации профессиональных знаний в данной предметной области [2]. В этой связи для повышения эффективности и качества специфических технологических процессов на водных путях требуется развитие наукоемких информационных ресурсов, основанных на математическом моделировании и алгоритмизации в современных вычислительных средах [1]. Развитие ресурсов предполагает использование опыта работы крупных специалистов служб и подразделений всех уровней иерархической структуры системы управления водными путями, его реализацию в форме программных и технических средств, способных кардинально изменить управленческую деятельность, существенно повысить уровень эксплуатации технических средств путем информационного обеспечения технологических процессов, использования новых принципов автоматизации [3].

Выполнение дноуглубительных работ на водных путях, их планирование связано с моделированием процессов в сложных многорукавных разветвлениях. Моделирование позволяет существенно упростить выбор обоснованного решения на этапе проведения машинного эксперимента [6].

Река представляет собой классический пример открытой гидравлической системы со сложной динамикой [4]. В ней происходят процессы обмена энергией и веществом с внешней средой и проявляются механизмы самоорганизации по схеме «поток–русло» [7]. В открытых системах переменные состояния могут стремиться к таким значениям, при которых уравнения баланса сохранения массы, энергии, количества движения могут образовывать инвариантные многообразия, характеризующие процессы стабилизации соотношений между переменными состояния. В результате уравнения динамики при наличии некоторых инвариантных многообразий вырождаются в пространстве состояний в систему нелинейных алгебраических уравнений. В частности, при построении моделей многорукавных разветвлений рек для установления соотношений между отметками уровней в узлах и расходами в рукавах в квазистационарных режимах используются уравнения параболического вида, обеспечивающие малую погрешность аппроксимации характеристик на водных коммуникациях небольшой протяженности.

Для моделирования процессов в многорукавных разветвлениях русла необходимо развивать численные методы и алгоритмы, базирующиеся на эффективных вычислительных процедурах, обладающих устойчивостью и обеспечивающих быструю сходимость решений нелинейных уравнений, в том числе с унимодальными свойствами [5]. Исследования показывают, что сходимость численного решения можно обеспечить за 6-8 шагов в широком диапазоне изменения координат состояния при выборе нулевого приближения. С этой целью необходимо использовать матрицы Якоби, для получения которых существуют стандартные процедуры в пакете символьной математики.

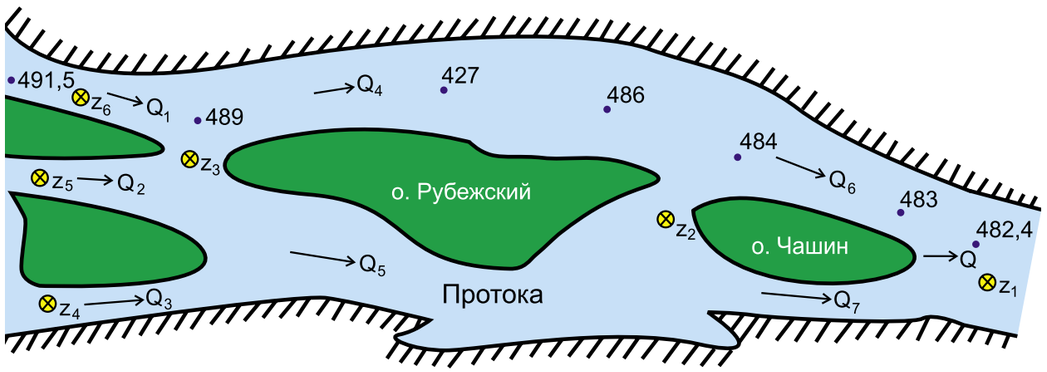

Рис. 1. Нижне-Рубежский перекат: Q – полный расход реки; z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6 – отметки уровней

В основу гидравлического расчета узла положены данные водпоста Абрамково по полным расходам воды в Большой Северной Двине, а также средним скоростям течения по участкам, изменяющимся в зависимости от отметок уровня воды относительно нуля графика водомерного поста. Водомерный пост Абрамково расположен на расстоянии 473 км от Архангельска. Исходные данные представлены в векторной форме: h – отметки уровня воды (см); Q1 – расходы воды ($м^3$/ с) как функции h; v1 – средние скорости течения (км/ч) на участке поселок Красноборск (559 км) – пристань Черевково (514 км).

Для оценки живого сечения реки на участке расположения переката (591,5-482,4 км) использованы данные о средних скоростях течения как функций отметок уровней на участке пристань Черевково (514 км) – пристань Верхняя Тойма (456 км): h=[40 60 80 100 120 140 160 180 200 260 300 350 400 450 500 … 550 600 650 700]; Ql=[750 870 1000 1140 1270 1460 1650 1830 2020 2720 3270 … 4100 5050 6050 7250 8500 9800 11100 12500]; v1=[2.15 2.35 2.53 2.71 2.88 3.04 3.19 3.33 3.47 3.82 4.07 4.34 … 4.57 4.77 4.95 5.10 5.23 5.33 5.41]; v2=[2.29 2.50 2.69 2.88 3.05 3.22 3.39 3.55 3.70 4.08 4.31 4.54 …4.74 4.92 5.08 5.22 5.37 5.46 5.52].

Расчеты выполнены с учетом теоретических положений, изложенных в работе [7]. Оценка падения свободной поверхности AZ на анализируемом участке водного пути произведена по формуле:

$$\Delta Z = \frac{Q^2}{K_c^2}\Delta L ,$$

где ΔZ – падение свободной поверхности, ΔL – длина расчетного участка, K_c – среднее значение модуля расхода,

$$K_c = \omega C\sqrt{h} ,$$

ω – площадь живого сечения, h – средняя глубина, C – коэффициент Шези, определенный по формуле Г.Л. Гладкова (см. [7], с. 94, формула 4.41):

C=CGL= sqrt(g)*71*(v1/sqrt(g*h))^0.75.

Расчеты реализованы с помощь файла sah600.m, приведенного ниже. Файл снабжен подробными комментариями, что исключает необходимость повторных пояснений непосредственно в тексте отчета. Для повышения точности аппроксимации исходных характеристик в файле использованы сплайны. Это обеспечило оценки расходов в ветвях и скоростей потоков воды с шагом дискретности delt, равным 1см. Отметки уровней воды при построении сплайнов представлены переменной x.

```
% sah600.m;
% Нижнее-Рубежский перекат, р. Северная Двина, 491,5-
482,4 км;
% от Архангельска;
% Зависимость расходов реки от отметок уровней по
измерениям;
% водпоста Абрамково (473км) – Q=fl(h);
% Средние скорости течения на участке г. Котлас – пос.
Красноборск;
% определенные постом Абрамково, как функции;
% отметок уровней – vl=f2(h);
% Средние скорости течения на участке пристань Черевково
(514 км) – f;
% пристань Верхняя Тойма (456 км.) – функция v2=f3(h);
% Коэффициент шероховатости принят равным
n=0.020 с/(м^1/3);
%
```

% Исходные данные:

```
h=[40 60 80 100 120 140 160 180 200 260 300 350 400 450 500 ...
550 600 650 700]*0.01; Ql=[750 870 1000 1140 1270 1460 1650
1830 2020 2720 3270 ... 4100 5050 6050 7250 8500 9800 11100
12500]; vl=[2.15 2.35 2.53 2.71 2.88 3.04 3.19 3.33 3.47 3.82 4.07
4.34 ... 4.57 4.77 4.95 5.10 5.23 5.33 5.41]./3.6; v2=[2.29 2.50
2.69 2.88 3.05 3.22 3.39 3.55 3.70 4.08 4.31 4.54 ... 4.74 4.92 5.08
5.22 5.37 5.46 5.52]./3.6;
x=(40:700)*0.01; Q=spline(h, Ql, x); Vl=spline(h, vl, x); V2=spline(h,
v2 ,x);
wl=Q./Vl; w2=Q./V2; plot(h,Q*0.001/,'.',h,v1*10,'.',h,v2*10,
'.'x,Q1*0.001, x, V1*10,x,V2*10), grid
pause
plot(x,w1 ,x,w2),grid
pause %
```

% Расчет коэффициентов Шези по формуле Г.Л. Гладкова:

```
g=9.81;
CGL=sqrt(g)*71*(vl./sqrt(g*h)).^0.75
CCGL=spline(h,CGL,x);
C0=CCGL;
% Среднее значение модуля расхода и его квадрата
% (ф-ла 4.24, стр. 81):
Kcp=w2.*C0.*(x.^0.5);
KKcp=Kcp. ^2;
% Определение падения свободной поверхности на участке
Нижне-Рубежского переката (491.5 – 482.4 км)
deltZp=(Q. ^2)./KKcp*(491.5-482.4)* 1000;
% Средние значения отметок уровней на участке 491,5-
482,4 км, % с учетом падения свободной поверхности
при изменении расходов,
% определены по формуле: H=x+deltZp
%
```

% Расчеты расходов в рукавах на участке переката Рубежский:

```
% Рис. 1.
deltZp=(Q. ^2)./KKcp*(491.5-482.4)* 1000;
deltZpl=(Q. ^2)./KKcp*(491.5-488.5)*1000;
deltZp2=(Q. ^2)./KKcp*(488.5-484.3)*1000;
deltZp3=(Q. ^2)./KKcp*(484.3-482.4)*1000;
% Проверка корректности решения:
[deltZp 1 +deltZp2+deltZp3 ;deltZp];
% Отметки уровней в точках z6,z3,z2,zl.
% В точке z6:
z6=H;
% В точке z3:
z3=z6-deltZpl;
% В точке z2:
z2=z3-deltZp2;
% В точке zl:
zl=z2-deltZp3;
% Проверка корректности решения:
[z6;z3;z2;zl;H;H-deltZp]
%
```

% Распределение расходов:

```
Q1=3/4*Q; Q2=1/16*Q; Q3=3/16*Q;
Q13=[Q1;Q2;Q3];
[sum(Q13);Q]
```

% Модуль сопротивления первого рукава:

```
m613=(z6-z3)./(Ql.^2);
z5=z6+0.012;
z4=z6+0.014;
```

```
m523=(z5-z3)./(Q2.^2);
m433-(z4-z3)./(Q3.^2);
[m613;m523;m433]
```

% Расчет модулей сопротивлений рукавов по расходам Q4,Q5 и отметкам:

```
% уровней z3,z2:
Q4=5/6*Q; Q5=1/6*Q;
m342=(z3-z2)./(Q4.^2);
m352=(z3-z2)./(Q5. ^2)
```

% Расчет модулей сопротивлений рукавов по расходам Q6,Q7 и отметкам:

```
% уровней z2,z1:
Q6=0.82*Q;Q7=0.18*Q;
m261=(z2-zl)./(Q6. ^2);
m271=(z2-zl)./(Q7. ^2);
%
```

% Расчет расходов в рукавах по заданным отметкам уровней и модулям:

```
% сопротивлений рукавов:
Ql=((z6-z3)./m613). ^0.5;
Q2=((z5-z3)./m523). ^0.5;
Q3=((z4-z3)./m433). ^0.5;
[sum([Ql;Q2;Q3]);Q];
Q4=((z3-z2)./m342). ^0.5;
Q5=((z3-z2)./m352). ^0.5;
[sum([Q4;Q5]);Q];
Q6=((z2-zl)./m261). ^0.5;
Q7=((z2-zl)./m271). ^0.5;
[sum([Q6;Q7]);Q];
% Результат расчета представим матрицей Qp:
Qp=[Ql;Q2;Q3;Q4;Q5;Q6;Q7]
% Построение графиков расходов в рукавах:
plotCx,Ql,x,Q25x,Q3,x,Q4,x,Q5,x,Q65x,Q7),grid
```

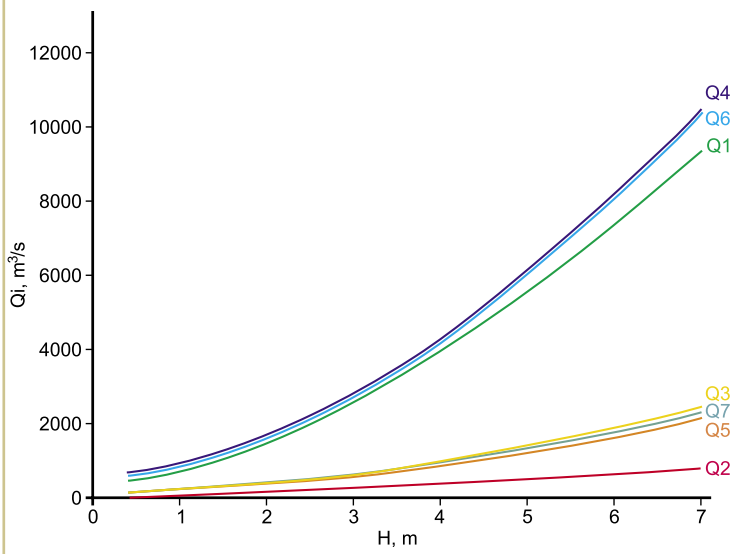

Рис. 2. Расходы в рукавах на участке Нижне-Рубежского переката

Графические построения расходов в рукавах (рис. 2) на участке водной коммуникации, представленной на рис. 1, выполнены при изменяющихся модулях сопротивлений рукавов в функции параметра h. Фрагменты расчета представлены «вырезками» из матрицы Qp размерности (7x 661):

```
Qp(:,l)=[562.5000 46.8750 140.6250 625.0000 125.0000 615.0000
135.0000]';
Qp(:,300H2.9278 0.2440 0.7319 3.2531 0.6506 3.2010 0.7027]'*
1.0e+003;
Qp(:,661)=[0.9375 0.0781 0.2344 1.0417 0.2083 1.0250 0.2250]'*
1.0e+004
```

Нетрудно видеть, что в каждой расчетной точке соблюдаются равенства расходов в узлах:

$$Q=Q1+Q2+Q3=Q4+Q5=Q6+Q7.$$

Так, для первого измерения Q=750 м /с, для второго Q=3903.7 м /с, для третьего Q=12500м /с, что соответствует принятой схеме модели (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях ограниченных ресурсов следует максимально использовать современные информационные технологии и методы практической оптимизации для поиска наиболее эффективных решений при управлении производственными и технологическими процессами на объектах и предприятиях водного транспорта. Это позволяет при минимальных затратах обеспечить управление технологическими процессами на качественно новом уровне, изменить технологию производства, эффективность работы подразделений и служб за счет исключения рутинных операций и внедрения информационного обеспечения в конкретных предметных областях при соответствующем научном сопровождении наиболее наукоемких технологий. С помощью технологий многоцелевых программных пакетов, и в частности вычислительной среды MatLAB, можно изменить технологические принципы обработки информации при выполнении расчетных и графических работ. Технологии многоцелевых программных пакетов позволяют кардинально улучшить качество моделирования, существенно сократить объемы рутинных операций при выполнении расчетов, использовать различные методы оценки параметров и характеристик участков водных коммуникаций, на основе современных математических моделей планировать выполнение дноуглубительных работ.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:
1. Белоцерковский О.М., Опарин А.М., Нечеткий В.М. Турбулентность: новые подходы. – М.: Наука, 2003. – 286 с.
2. Варжапетян А.Г., Глущенко В.В., Глущенко П.В. Системность процессов создания и диагностики технических структур. – СПб.: Политехника, 2004. – 186 с.
3. Глущенко В.В., Сахаров В.В., Сумеркин Ю.В. Моделирование динамических систем и электрических цепей в среде MatLAB: Учеб. пособие/СПГУВК. СПб., 1998 – 293 с.
4. Каганович Б.М., Филиппов СП. Равновесная термодинамика и математическое программирование. Новосибирск .: Наука, 1995 – 236 с.
5. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. – 278 с.
6. Пригожий Илья, Стенгерс Изабелла. Время. Хаос. Квант. М.: Изд. группа «Прогресс», 1999. – 268 с.
7. Селезнев В.М., Гришанин К.В., Гладков Г.Л. и др. Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках. – СПб.: ЛИВТ, 1992. – 312 с.