

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 681.518:004.942

Т.И. Гаврилова, Е.Н. Поселенов, М.М. Чиркова

## ОБОСНОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ

Волжский государственный университет водного транспорта

Рассматривается возможность повышения надежности прохождения водоизмещающим судном внутреннего плавания сложных участков судового хода за счет повышения информационного обеспечения рулевого и повышения скорости работы приводов рулевого органа. Представлен анализ (на примере прохода судами пролетов моста) недостаточности информации при принятии решения о возможности безопасного прохода проблемного участка пути как возможной причины аварии.

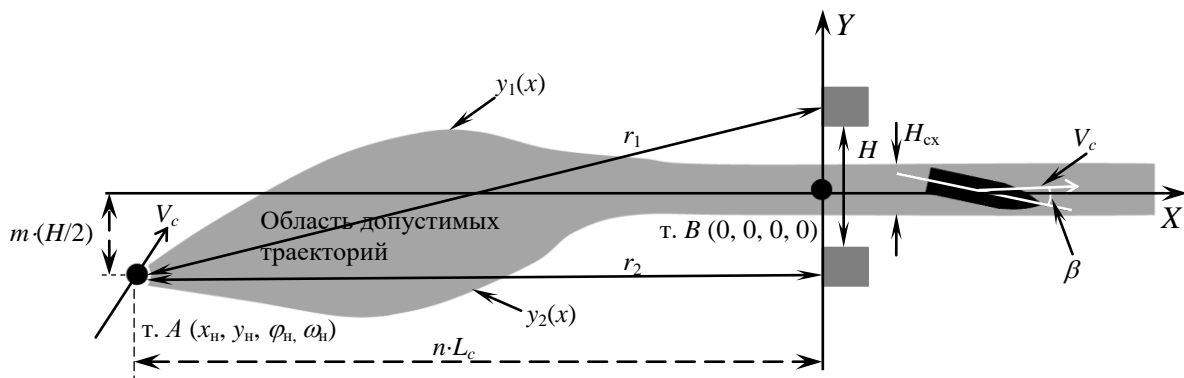
*Ключевые слова:* управляемость судов, информационное обеспечение, управление подвижными объектами.

### Введение

Несмотря на большое количество исследований по анализу путей повышения безопасности движения судов в пролете мостов [1-3], количество навалов на опоры мостов и инцидентов с посадкой судна на мель при проходе мелководья не уменьшается. Причиной обозначают состояние оборудования или внешней среды, иногда в качестве таковой указывают человеческий фактор.

Целью настоящей работы является анализ (на примере прохода судами пролетов моста) недостаточности информации при принятии решения о возможности безопасного прохода проблемного участка пути как возможной причины аварии. Для этого рассматривается задача перевода объекта из т.  $A$  в т.  $B$ , где т.  $A$  – место принятия решения о подготовке к выводу объекта на проблемный участок пути, т.  $B$  – начало проблемного участка (рис. 1). Управление движением судна по траектории подхода к проблемному участку пути должно удовлетворять условию: для любого  $x$  должно выполняться  $y_1(x) > y(x(t)) > y_2(x)$ , где текущие значения координат центра тяжести судна  $(x, y)$  рассчитываются по данным  $(r_1, r_2)$  радиобуев, которые размещаются на опорах моста. Минимум и максимум функций  $x(t)$ ,  $y(x)$  определяются конструктивными параметрами судна, начальными значениями координат состояния и состоянием внешней среды. По данным о расстояниях  $r_1, r_2$ , полученных от радиобуев, можно рассчитывать координаты  $x(t)$  и  $y(x(t))$  и определять текущее положение судна относительно начала проблемного участка.

В момент принятия решения о подготовке к проходу проблемного участка (т.  $A$ ) расстояние до точки  $B$  переводится в количество длин судна ( $n = x_n/L_c$ ), а отклонение от оси судового хода на проблемном участке пути  $y_n(x)$  в количество  $m = y_n/(H/2)$ . Координаты состояния  $\varphi_n$  и  $\omega_n$  могут принимать любые значения. В точке  $B$  управление и координаты  $x_k, y_k, \varphi_k, \omega_k$  должны удовлетворять условиям  $U(t) = 0 \pm \delta U$ ,  $x_k = 0 \pm \delta x$ ,  $y_k = 0 \pm \delta y$ ,  $\varphi_k = 0 \pm \delta \varphi$ ,  $\omega_k = 0 \pm \delta \omega$ , где  $U(t)$  – управление (угол перекаладки рулевых органов),  $\delta U, \delta x, \delta y, \delta \varphi, \delta \omega$  – погрешности измерения координат.



**Рис. 1. Перевод объекта из т. А в т. В**

$H$  – ширина пролета моста,  $H_{cx}$  – необходимая ширина судового хода, которая зависит от ширины судна и угла дрейфа  $\beta$  (угол между диаметральной плоскостью судна и вектором скорости движения  $V_c$ ),  $\varphi$  – курсовой угол,  $\omega = d\varphi(t)/dt$

### Динамика управляемых объектов

Повышение качества процесса управления техническими устройствами невозможно без детального изучения их свойств, некоторые из которых необходимо учитывать при разработке алгоритма управления, в частности, для управления движением судна по траектории (при использовании авторулевого) или учитывать штурману при управлении судном в сложных условиях плавания.

Теоретические исследования показали, а натурные эксперименты с речными водоизмещающими судами подтвердили, что суда являются нелинейными объектами, динамика которых существенно зависит от состояния внешней среды. У рассматриваемого класса объектов неоднозначны не только собственные, но и вынужденные движения, как установившиеся состояния, так и переходные процессы. Этим обуславливается появление некоторых особенностей при реакции судна на изменение управления. Эти особенности можно разделить на два класса – внешние и внутренние. Под внешними будем понимать вид статической характеристики объекта  $\omega = f(U)$ , рис. 2, а именно: 1) количество и расположение неустойчивых ветвей характеристики управляемости от т.  $A_+$  до т.  $A_-$ ; 2), критические значения управлений  $U_k$ , при которых происходит срыв с одной устойчивой ветви на другую; 3) управление  $U^*$ , соответствующее нулевому значению координаты состояния  $\omega$ . Под внутренними (скрытыми) свойствами объекта будем понимать его способность при некоторых сочетаниях управления и координат состояния проявлять не характерные для него особенности: временный эффект пониженной и обратной управляемости [4-7]. Когда объект управления является подвижным, то неквалифицированное управление (что возможно из-за недостаточной информированности) может потребовать лишних затрат энергии и быть небезопасным. Кроме того, существующие средства отображения текущей информации недостаточно информативны. Предсказание же состояния объекта, хотя бы на несколько секунд, малодостоверно, так как структура и параметры математической модели зависят от внешней среды и требуют непрерывного контроля и настройки.

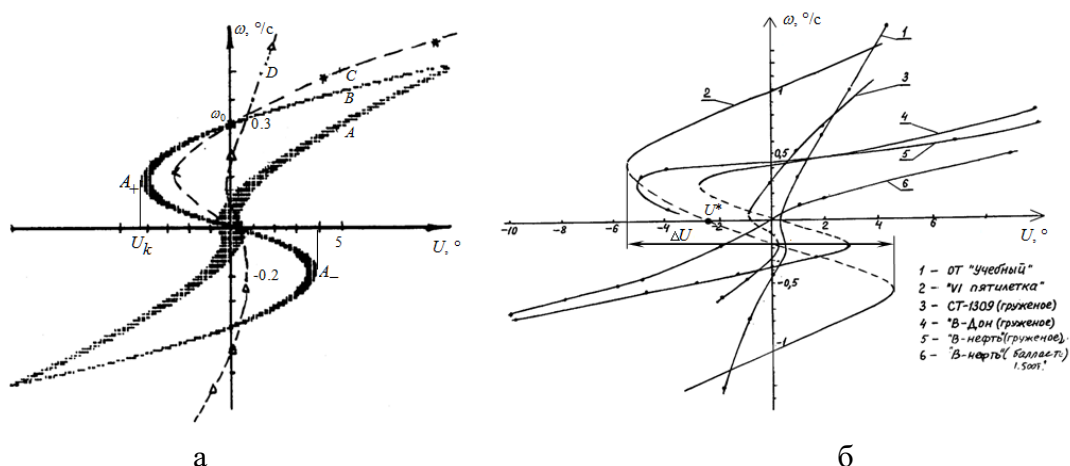
Наиболее сильное влияние на показатели процесса движения судна оказывают следующие аспекты.

1. Отсутствие знаний о существовании динамических особенностей водоизмещающих судов с нелинейной характеристикой управляемости в области малых управлений. В частности, информация о том, что при изменении внешней среды ( $F$ ) меняется вид характеристики  $\omega(U)$  и, соответственно,  $U_k$ , меняются величины  $\Delta U$  и управление  $U^*$ , необ-

ходимое для поддержания  $\varphi(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $\beta(t)$  на уровне  $\varphi(t)=0\pm\delta\varphi$ ,  $\omega(t)=0\pm\delta\omega$ ,  $\beta(t)=0\pm\delta\beta$ , (рис. 2).

2. Отсутствие или поступление с недостаточной точностью данных о текущем месторасположении центра тяжести судна –  $x(t)$ ,  $y(x)$ .

В качестве примера на рис. 2, а представлены характеристики управляемости  $\omega(U)$  двух судов, проход которых через опоры моста моделируется в данной работе. Нефтеналивное судно проекта 558 (А – глубокая вода, В – мелководье) и пассажирское судно проекта 588 (D – глубокая вода, С – мелководье), характеристики построены по результатам натурных испытаний. Конструктивные показатели судна проекта 558: длина  $L$  – 132.6 м, ширина  $B$  – 16.9 м, осадка  $T$  – 3.58 м, коэффициент полноты корпуса – 0.845. Конструктивные показатели судна проекта 588: длина  $L$  – 95.8 м, ширина  $B$  – 14.3 м, осадка  $T$  – 2.5 м, коэффициент полноты корпуса – 0.45.



**Рис. 2. Характеристики управляемости судов разных проектов при разной глубине фарватера**

а – характеристики судов, проход которых через проблемные участки моделируется в данной работе,  
б – характеристики аналогичных судов (из результатов натурных испытаний)

Зависимости  $\beta(U)$  носят аналогичный характер.

Минимально возможное для конкретного проекта судна значение угловой скорости поворота ( $\omega_{min}$ ) при максимально переложеном руле ( $R_{max}$ , что зависит от состояния внешней среды) определит размер области возможного его возврата с целью повторной попытки перехода в т. В. Данные о величинах  $\omega_{min}$ ,  $R_{max}$  должны оцениваться и храниться в базе данных о динамических особенностях судна и непрерывно корректироваться в процессе его эксплуатации.

На рис. 2, б  $\Delta U$  – область управлений, при которых объект, при одном и том же  $U$ , может находиться в 3-х различных состояниях, одно из которых является неустойчивым типа седла. При  $U=U^*$  это неустойчивое состояние имеет координаты  $\omega=0\pm\delta\omega$ ,  $\beta=0\pm\delta\beta$  и объект, приведенный в это состояние при проходе прямолинейного участка пути, пройдет его значительно быстрее за счет уменьшения рысканья и ему потребуется меньшая ширина судового хода ( $H_{сх}$ ). Задача управления – привести объект в т. В так, чтобы в момент подхода к опорам моста  $U=U^*$ , а координаты состояния и скорости их изменения были близки к нулевым значениям:  $y(x)=0\pm\delta y$ ,  $\omega=0\pm\delta\omega$ ,  $\beta=0\pm\delta\beta$ . Величина  $U^*=var(F)$ , определяется состоянием внешней среды – силой и направлением ветра и волны. Значение  $\Delta U$  зависит от глубины фарватера. При автоматическом управлении движением судна алгоритм поиска  $U^*$  достаточно сложный.

Изменение характеристик управляемости и, как следствие, величины  $U^*$  влечет за собой непредсказуемые изменения траектории судна. Поэтому крайне важной для принятия решения об управлении судном при проходе проблемных участков является ин-

формация об отклонении реальной траектории судна от области допустимых траекторий (рис. 1), и возможность непрерывной визуализации процесса движения для упрощения задачи судоводителя.

### Моделирование прохода судном пролетов моста

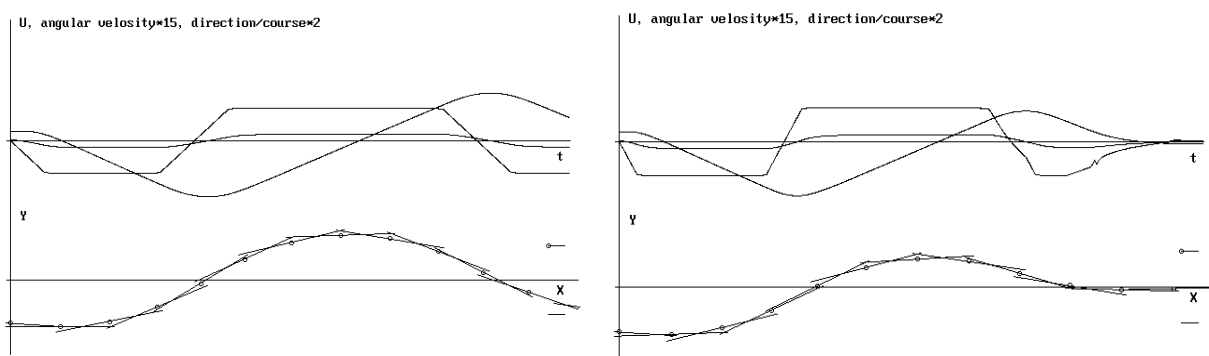
Вид и показатели траекторий судна получены по результатам компьютерного моделирования. Для моделирования использовалась классическая модель [8, 9]. Оценки коэффициентов математической модели получены из результатов обработки данных натуральных испытаний нефтеналивного судна проекта 558, и пассажирского проекта 588.

Натурные эксперименты, проводимые ранее для оценки динамики речных водоизмещающих судов и коэффициентов математической модели, показали, что опытный судоводитель, при внимательном наблюдении за движением судна, может вести его по траектории с достаточно высокой степенью точности ( $\varphi(t)$  в пределах  $0.4 \div 0.6^\circ$ ,  $\omega(t) - 0.02 \div 0.03^\circ/\text{с}$  и  $\Delta Y \approx 1-2\text{м}$ ), делая, в некоторых ситуациях, до 20 и более переключений руля в минуту в зависимости от проекта судна и внешней обстановки. Но такое управление требует большого психофизиологического напряжения. При небрежном управлении неустойчивым на курсе судном или при недостаточной информации ( $m$  и  $n$ ) падает точность удержания судна на заданном направлении, увеличиваются отклонения от заданной траектории, диапазон изменения угла дрейфа, величина  $H_{\text{сх}}$ , и, как следствие этого, растут экономические затраты и вероятность аварий.

По результатам моделирования проводился анализ траекторий судов при проходе опор трех мостов, расположенных аналогично мостам в районе г. Нижний Новгород (р. Волга) по причине, изложенной в [10]. Ширина между опорами первого и второго мостов  $H=80$  м, расстояние между мостами 100 м. Скорость движения судна – 2 м/с, время наблюдения – 360 с. На основании анализа были выявлены факторы ( $p_i$ ), влияющие на показатели траектории: соотношение  $n/m$  в момент принятия решения (т. А), скорость переключения рулевых органов ( $da/dt$ ,  $^\circ/\text{сек}$ ) – скорость реакции на изменение управления  $U(t)$ , допустимая точность отклонения центра тяжести судна от оси судового хода при проходе проблемного участка ( $Y_{\text{доп}}$ , м), учитываемая при формировании управления. При оценке движения судна по проблемному участку пути оценивались показатели  $\Delta Y_{\text{max}}$ ,  $\beta_{\text{max}}$ ,  $H_{\text{сх}}$ .

Результаты моделирования для некоторых ситуаций представлены на рис. 3, 4.

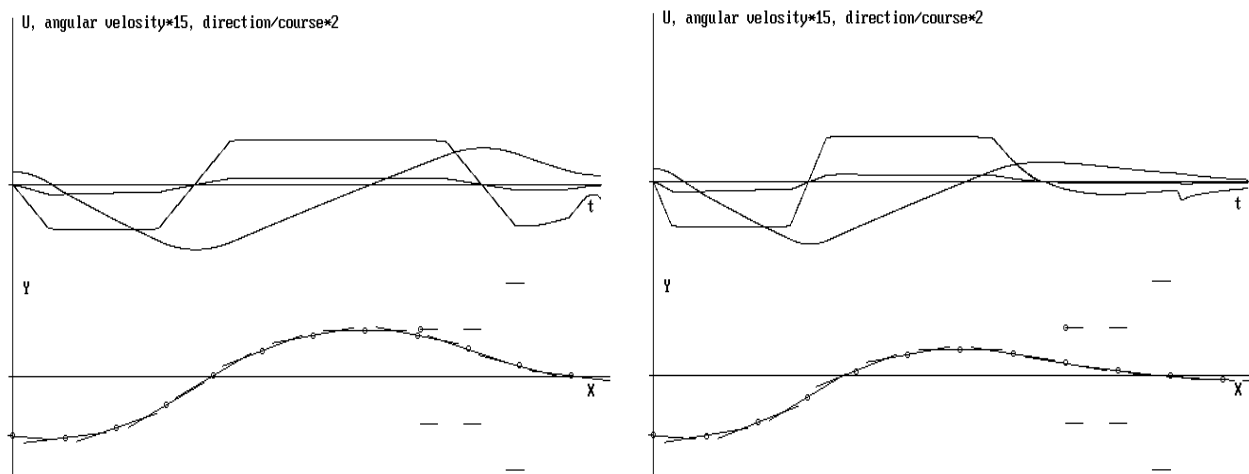
Для сравнения на рис. 5 представлены осциллограммы и траектория судна проекта 558 при идеальных условиях и рис. 6 при боковом ветре.



**Рис. 3. Результаты моделирования прохода сложного участка, нефтеналивное судно проекта 558**

а) Факторы  $n/m = -4$ ,  $da/dt = 2^\circ/\text{с}$ ,  $Y_{\text{доп}} = 1\text{м}$   
Показатели  $\Delta Y_{\text{max}} = 23\text{м}$ ,  $\beta_{\text{max}} = 13^\circ$ ,  $H_{\text{сх}} = 46\text{м}$

б) Факторы  $n/m = -4$ ,  $da/dt = 4^\circ/\text{с}$ ,  $Y_{\text{доп}} = 1\text{м}$   
Показатели  $\Delta Y_{\text{max}} = 2\text{м}$ ,  $\beta_{\text{max}} = 1^\circ$ ,  $H_{\text{сх}} = 19\text{м}$



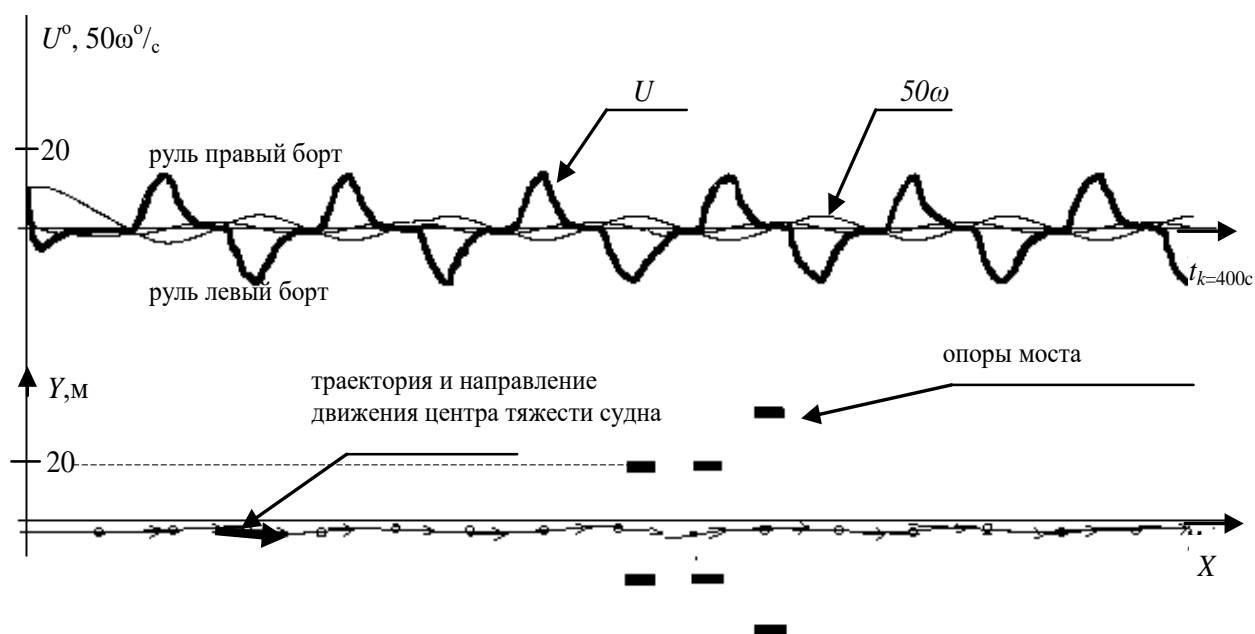
**Рис. 4. Результаты моделирования прохода сложного участка, пассажирское судно проекта 588**

а) Факторы  $n/m = -4$ ,  $d\alpha/dt = 2^\circ/c$ ,  $Y_{доп} = 1\text{ м}$

Показатели  $\Delta Y_{\max} = 34\text{ м}$ ,  $\beta_{\max} = 14^\circ$ ,  $H_{сх} = 38\text{ м}$

б) Факторы  $n/m = -4$ ,  $d\alpha/dt = 4^\circ/c$ ,  $Y_{доп} = 1\text{ м}$

Показатели  $\Delta Y_{\max} = 10\text{ м}$ ,  $\beta_{\max} = 7^\circ$ ,  $H_{сх} = 26\text{ м}$



**Рис. 5. Траектория центра тяжести судна при спокойных внешних условиях**

Параметры траектории:  $\Delta Y_{\max} = 6\text{ м}$ ,  $\beta_{\max} = 3^\circ$ , максимальное значение ширины судового хода  $H_{сх} = 25\text{ м}$ ,  $U_{\max} \sim 8^\circ$ , пройденный путь  $S_{п} = 788\text{ м}$  при максимально возможном  $S_0 = 800\text{ м}$ .

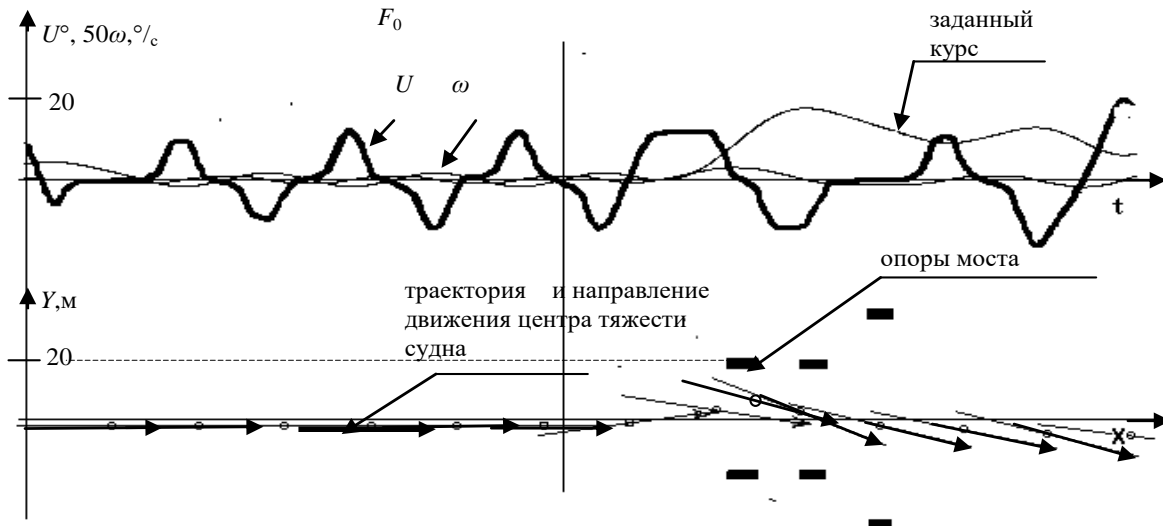


Рис. 6. Траектория судна при боковом ветре, возникшем при проходе пролетов моста

Параметры траектории:  $\Delta Y_{\max} \approx 20$  м,  $H_{\text{сх}} \approx 50$  м,  $U_{\max} \approx 15^\circ$ ,  $S_{\text{п}} = 781$  м.

Анализ результатов моделирования (рис. 7) позволяет предложить некоторые пути решения поставленной задачи повышения безопасности движения судов по проблемным участкам пути и сделать следующие выводы.

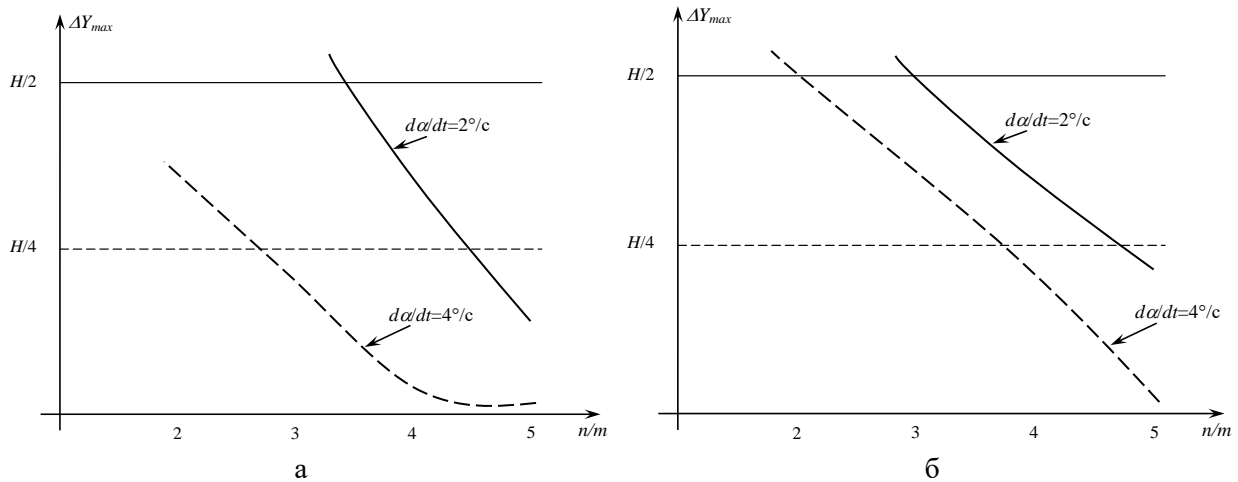


Рис. 7. Зависимость  $\Delta Y_{\max}$  от соотношения  $n/m$  при разной скорости перекадки руля:  
а – нефтеналивное судно проекта 558, б – пассажирское судно проекта 588

### Выводы

Наиболее значимыми факторами являются: соотношение  $n/m$  и скорость работы рулевого привода  $da/dt$  (рис. 7).

Повышение надежности прохождения узостей возможно за счет:

- расширения информационного обеспечения рулевого/авторулевого: использовать радиометки, РЛС, эхолоты, датчики курса, угловой скорости и ускорения, угла дрейфа, скорости ветра и течения для более точной оценки координат судна, в частности, оценки отклонения его центра тяжести ( $\Delta Y$ ) от оси судового хода и оценки соотношения  $n/m$  в момент принятия решения о движении к проблемному участку;
- повышения скорости работы привода рулевых органов ( $da/dt$ );
- дублирования информации о факторах, влияющих на процесс движения по заданной траектории датчиками разной физической природы.

## Библиографический список

1. Авария на морских (речных) судах // Revolution – Allbest. [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://revolution.allbest.ru/life/00306009\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/life/00306009_0.html), свободный (26.08.2019).
2. **Зайков, В.И.** Повышение безопасности при движении судов под мостами / В.И. Зайков, М.А. Колосов // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 5. – С. 39-40.
3. **Груздев, Н.М.** Классификация, статистика и основные причины морских происшествий / Н.М. Груздев. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://podlodka.info/education/23-analysis-of-navigational-information/259-classification-of-statistics-and-main-causes-of-marine-accidents.html?showall=1> (26.08.2019).
4. **Чернышов, А.В.** Особенности динамики и алгоритмы управления состоянием объектов / А.В. Чернышов, М.М. Чиркова // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2003. – №4. – С. 153-158.
5. **Чиркова, М.М.** Разработка методов идентификации и управления движением неустойчивого на курсе объекта со скрытыми динамическими особенностями / Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – Н. Новгород, 1998.
6. **Гаврилова, Т.И.** О критериях управляемости подвижных объектов / Т.И. Гаврилова, М.М. Чиркова // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Серия: Математическое моделирование и оптимальное управление. – 2006. – Вып. 3 (32). – С. 127-132.
7. **Чиркова, М.М.** Выбор критерия для параметрической оптимизации алгоритма управления объектом в условиях быстроменяющейся внешней среды / М.М. Чиркова, Е.Н. Поселенов // Журнал университета водных коммуникаций. – 2012. – (13). – С. 132-136.
8. **Войткунский, Я.И.** Управляемость водоизмещающих судов: Справочник по теории корабля / Я.И. Войткунский. – Л.: Судостроение, 1985. – Т. 3. – С. 544.
9. **Басин, А.М.** Ходкость и управляемость судов / А.М. Басин – М.: Транспорт, 1961. – 175 с.
10. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://mintrans.government-nnov.ru/?id=96650> (26.08.2019).

*Дата поступления  
в редакцию: 02.02.2020*

**T.I. Gavrilova, E.N. Poselenov, M.M. Chirkova**

**JUSTIFICATION OF THE INFORMATION COMPONENTS  
TO CONTROL THE MOVEMENT OF THE SHIP  
IN DIFFICULT SAILING CONDITIONS**

Volga State University of Water Transport

**Findings:** Possibility of increase of reliability of passage of difficult sites of a way by the vessel by increasing the information support of the navigator and increase in speed of movement of a rudder is considered.

**Purpose:** To reduce the number of accidents in difficult ship traffic conditions.

**The problem solution:** Possibility of increase of reliability of passage of difficult sites of a way of the vessel by increasing the information support of the navigator and increase in speed of movement of a rudder is considered.

Despite the large number of publications with the analysis and proposals «How to increase the safety of ships during the passage of shallow water crossings and bridge spans», the number of strikes on the bridge support and incidents with the sinking of ships during the passage of shallow waters does not decrease. Usually, the cause of any accident is sought in equipment or the environment and sometimes the human factor may be cause of accident. The purpose of this work is to show, using the example ship traffic under the bridge, that the lack of information in deciding whether a problem section of the track can be safely passed may also be related to these causes. For this purpose, the task of moving the object from point A to B is considered, where A is the place where the decision is made to prepare the object for the problem section of the route, B is the beginning of the problem section.

*Key words:* controllability of vessels, information support, traffic control of vessel, dynamics of controlled objects.