

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.124: 532

П. В. Гуров

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДВИЖЕНИЯ БУКСИРУЕМОГО ОБЪЕКТА ЗА БУКСИРОВЩИКОМ НА КРУГОВОЙ ТРАЕКТОРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

**Цель:** Исследование движения буксируемого объекта по круговой траектории.**Метод:** Использовано математическое моделирование, для анализа движения буксируемого объекта под управляющим воздействием буксирного троса.**Результаты:** Определено влияние гидродинамических характеристик корпуса буксируемого объекта на размер «петли неустойчивости» на диаграмме управляемости. Установлен параметр, уменьшающий границы петли и увеличивающий диапазон устойчивого движения. Отмечена возможность определения необходимой длины буксирной связи, обеспечивающей движение объектов буксирного порядка по одной траектории.**Выводы:** Использование диаграммы управляемости позволяет обозначить границы устойчивого режима движения буксируемого объекта по круговой траектории за буксировщиком.*Ключевые слова:* математическое моделирование, буксируемый объект, диаграмма управляемости, устойчивость движения, траектория.

Рассмотрим установившееся движение буксируемого объекта по круговой траектории на тихой воде, как это показано на рис. 1.

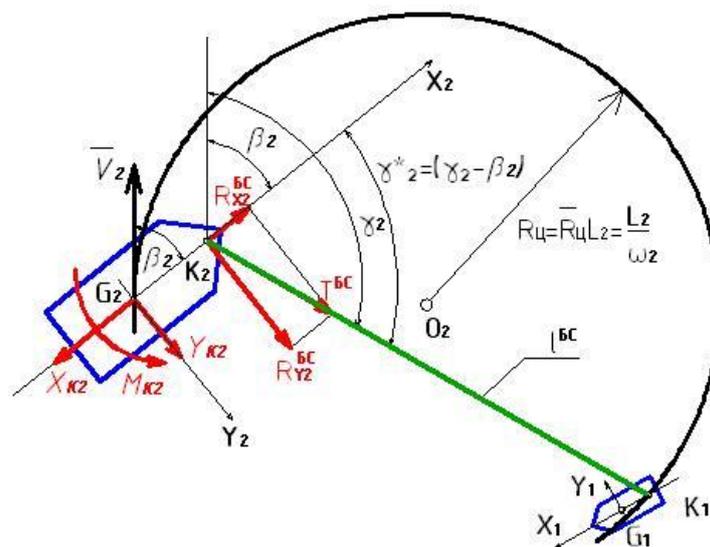


Рис. 1. Круговая циркуляция

Для обозначения величин, характеризующих движение буксируемого объекта, используем индекс 2, для буксировщика – индекс 1. Данное движение будем рассматривать как режим установившейся циркуляции с радиусом  $R_{ц}$ . Точка  $K_1$  (клюз буксировщика) движет-

ся по круговой траектории так, что угол управления буксирной связью постоянен, т.е.  $\gamma_2 = \text{const}$ .

Запишем уравнения движения буксируемого объекта в горизонтальной плоскости:

$$\begin{aligned}(m_2 + \lambda_{11}) \frac{dV_{X2}}{dt} &= N_{X2} + (m_2 + \lambda_{22}) V_{Y2} \omega_2 + \lambda_{26} \omega_2^2; \\ (m_2 + \lambda_{22}) \frac{dV_{Y2}}{dt} &= N_{Y2} - (m_2 + \lambda_{11}) V_{X2} \omega_2; \\ (I_{2Z2} + \lambda_{66}) \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{Z2} + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) V_{X2} V_{Y2} - \lambda_{26} V_{X2} \omega_2.\end{aligned}\quad (1)$$

В поточной системе координат при малых значениях угловой скорости  $\omega_2$  и угла дрейфа  $\beta_2$  можно допустить, что

$$V_{X2} = V_2 \cos \beta_2 \approx V_2; V_{Y2} = -V_2 \sin \beta_2 \approx V_2 \beta_2. \quad (2)$$

Проекции главного вектора и главного момента внешних сил будут равны:

$$\begin{aligned}N_{X2} &= X_{K2} + R_{X2}^{BC}; \\ N_{Y2} &= Y_{K2} + R_{Y2}^{BC}; \\ M_{Z2} &= M_{K2} + M_{Z2}^{BC},\end{aligned}\quad (3)$$

где  $X_{K2}, Y_{K2}, M_{K2}$  - проекции гидродинамических сил и момента на корпусе буксируемого объекта.

Составляющие силы воздействия буксирной связи на корпус и момент можно выразить как:

$$\begin{aligned}R_{X2}^{BC} &= T^{BC} \cos(\gamma_2 - \beta_2); \\ R_{Y2}^{BC} &= T^{BC} \sin(\gamma_2 - \beta_2); \\ M_{Z2}^{BC} &= R_{Y2}^{BC} \cdot L_{K2}.\end{aligned}\quad (4)$$

Исследование движения буксируемого объекта с помощью уравнений (1) можно производить несколькими способами:

1. Преобразованием их в систему алгебраических уравнений при допущениях о малости  $\omega_2$  и  $\beta_2$  (линейная теория);

2. Представлением буксируемого объекта свободным, а буксирной связи – средством управления движением. Тогда система дифференциальных уравнений, с их решением численными методами, описывает переходный процесс буксируемого объекта из некоторого начального состояния в установившееся циркуляционное движение при постоянном управлении (по типу самоходного свободного судна с управлением рулями). В этом случае не требуется допущений линейной теории управляемости.

*Первый способ* исследования удобен при анализе движения состава на прямом курсе, т.е. в условиях буксировочного дрейфа. Для криволинейного движения буксируемого объекта более важно знать параметры маневра при изменении направления движения, прохождения криволинейных участков пути и т. д. Поэтому сосредоточим внимание на *втором способе* исследования.

*В этом способе* буксирную связь будем рассматривать как средство управления, воз-

действие которого определяется выражениями (4). Если клюз буксира  $K_1$  движется по окружности, концентричной с окружностью буксируемого объекта, то воздействие буксирной связи на буксируемый объект  $(T^{BC}, \gamma_2)$  не будет изменяться во времени, т.е. будет постоянным. Примем это допущение.

Угол  $\gamma_2$  можно представить задаваемым параметром по типу угла перекладки рулей судна. Угол  $\beta_2$  представляет собой потерянный угол управления, зависящий для данного буксируемого объекта от кинематических параметров движения. Буксировочное усилие  $T^{BC}$ , также представляется задаваемым параметром движения буксируемого объекта, напоминающим упор гребного винта судна.

Тогда движение буксируемого объекта можно охарактеризовать как движение свободного судна под действием средств управления с задаваемыми параметрами  $T^{BC}$  и  $\gamma_2$ . Такое упрощенное представление движения буксируемого объекта позволяет провести более глубокое изучение его свойств.

Заметим, что в качестве задаваемого параметра управления удобнее использовать угол  $\gamma_2^*$  (рис. 1). Это угол отклонения буксирной связи от диаметральной плоскости буксируемого объекта, он является эффективным углом управления, его можно наблюдать, измерять, контролировать.

Тогда угол  $\gamma_2$  будет равен:

$$\gamma_2 = \gamma_2^* + \beta_2, \tag{5}$$

а составляющие воздействия буксирной связи примут вид:

$$\begin{aligned} R_{X2}^{BC} &= T^{BC} \cos \gamma_2^*; \\ R_{Y2}^{BC} &= T^{BC} \sin \gamma_2^*. \end{aligned} \tag{6}$$

Итак, приняв в качестве задаваемых параметров углы ориентации буксирной связи  $\gamma_2$  или  $\gamma_2^*$ , можно с помощью уравнений (1) рассчитать соответствующие разным углам циркуляции буксируемого объекта и построить графические зависимости:  $\bar{\omega}_2(\gamma_2)$ ,  $\bar{\beta}_2(\gamma_2)$ ,  $\gamma_2^*(\gamma_2)$ . Эти зависимости по аналогии с обычным судном можно назвать *диаграммой управляемости буксируемого объекта* (рис. 2, рис. 3).

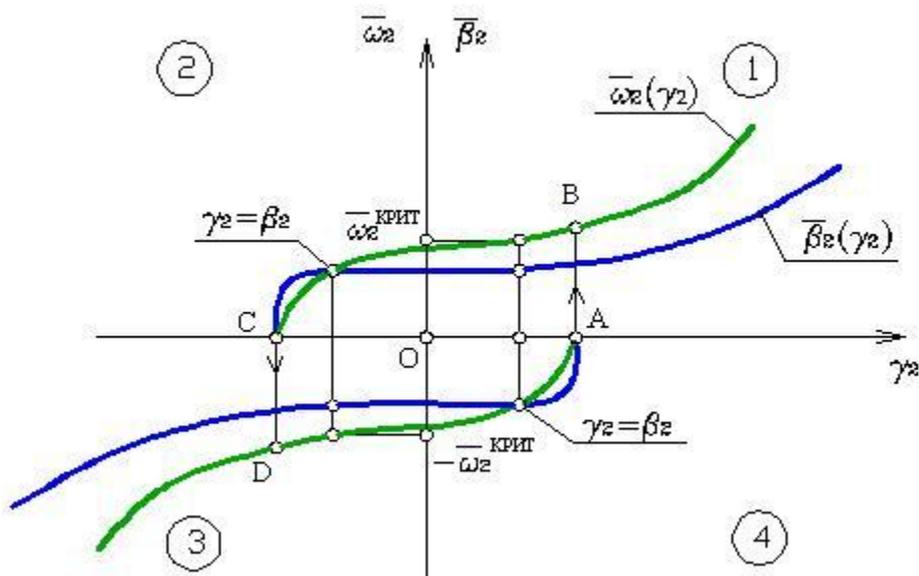


Рис. 2. Первая диаграмма управляемости буксируемого объекта

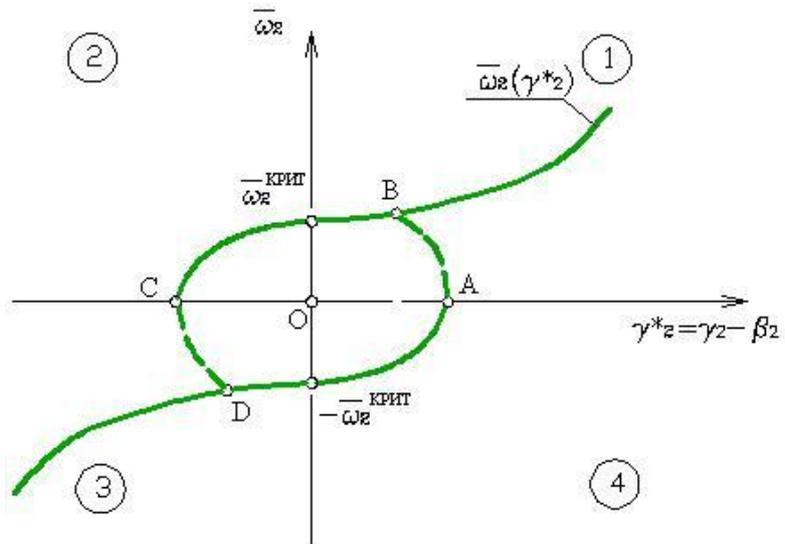


Рис. 3. Вторая диаграмма управляемости буксируемого объекта

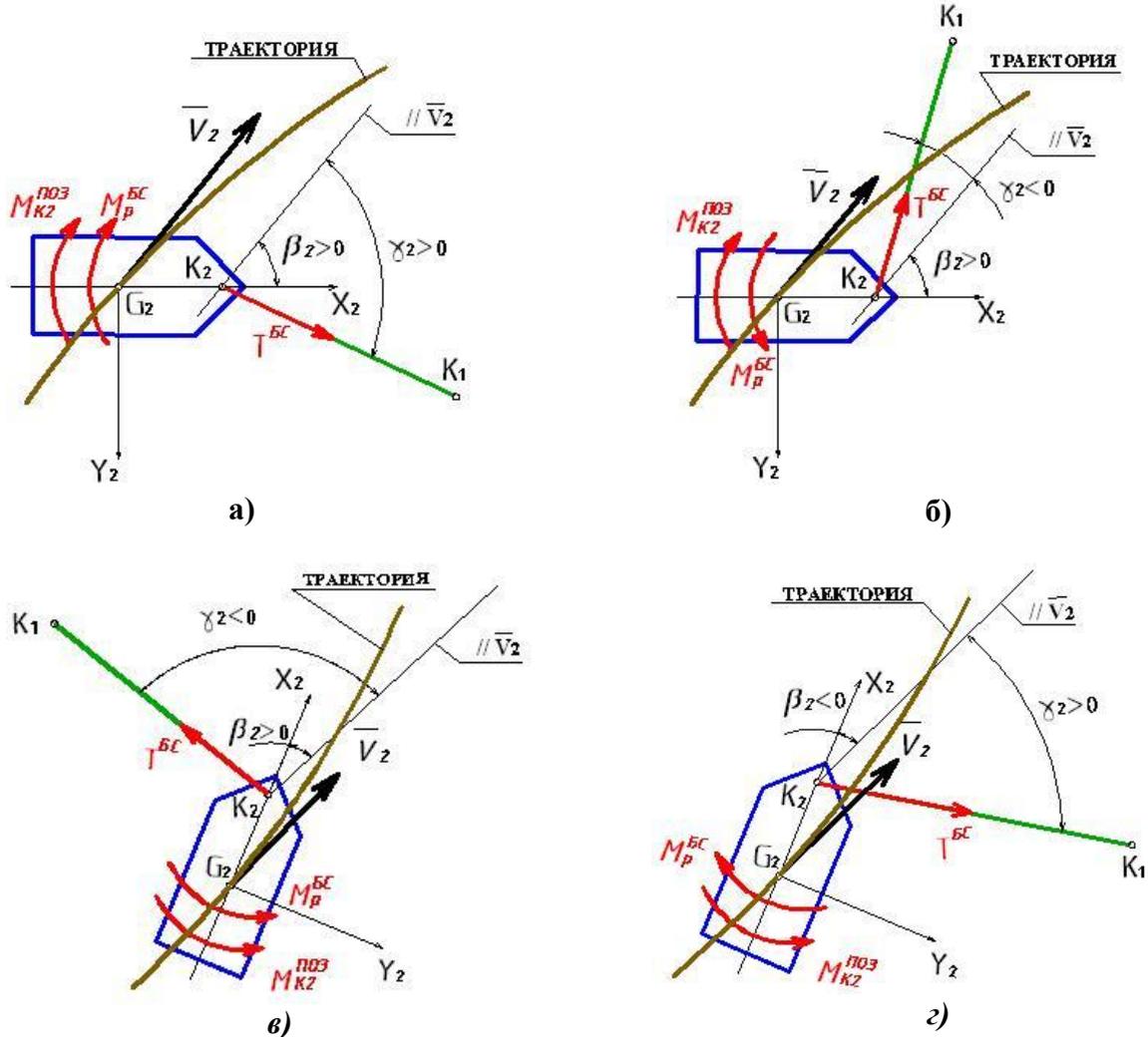


Рис. 4. Положение буксируемого объекта:

- а - квадрант 1 ( $\bar{\omega}_2 > 0$  и  $\gamma_2 > 0$ ); б - квадрант 2 ( $\bar{\omega}_2 > 0$  и  $\gamma_2 < 0$ );
- в - квадрант 3 ( $\bar{\omega}_2 < 0$  и  $\gamma_2 < 0$ ); з - квадрант 4 ( $\bar{\omega}_2 < 0$  и  $\gamma_2 > 0$ )

На диаграммах линии  $\bar{\omega}_2(\gamma_2)$  и  $\bar{\omega}_2(\gamma_2^*)$  - это линии устойчивых режимов движения по

криволинейной траектории, линии (A – B) и (C – D) - это линии перехода от одного положения буксируемого объекта к другому при смене направления его вращения.

Рассмотрим подробнее отдельные области диаграмм, квадранты 1, 2, 3, 4 (рис. 2 и рис. 3) и определим положение буксируемого объекта по отношению к его траектории (рис. 4, а, б, в, г).

В центре диаграммы образуется «петля неустойчивости», точки A – B – C – D (рис. 2 и рис. 3), внутри которой имеется два относительно устойчивых режима движения буксируемого объекта, но с противоположными направлениями вращения. Можно предположить, что ширина «петли неустойчивости» и амплитуды автоколебательного режима движения, при буксировке прямым курсом, будут взаимосвязаны. Интенсивность колебаний, очевидно, будет также зависеть от степени демпфирования вращения корпуса буксируемого объекта, характеристик буксирной связи и закона движения буксировщика.

Заметим, что зная углы ориентации буксирной связи  $\gamma_2$  или  $\gamma_2^*$ , по диаграммам управляемости (рис. 2 и 3), можно найти значения относительной угловой скорости  $\bar{\omega}_2 = \frac{1}{R_{II}}$ . За-

тем, через построение траектории движения буксирного состава, определить необходимую длину буксирного троса  $l^{BC}$ , соответствующую условию движения буксировщика по этой же траектории, что и буксируемый объект (рис. 1).

В качестве примера, проведены расчеты движения реального буксируемого объекта на круговой траектории. Исследовалось движение за идеальным буксировщиком грузового судна, по характеру обводов близкого к проекту 19610. Исходными данными для расчёта явились:

$$\begin{array}{llll} L=121,0\text{м}; & B=14,8\text{м}; & T=3,33\text{м}; & \delta=0,821 \\ V=4900\text{м}^3; & V_0=5,5\text{м/с}; & R(V_0)=112\text{кн}; & L_{K2}=60\text{м}; \\ k_{10}=-0,0307, & k_{31}=0,0583, & k_{21}=0,102, & k_{32}=-0,0341. \end{array}$$

Разработана математическая модель движения буксируемого объекта, в которой в качестве главного средства управления используется буксирная связь с управляющим воздействием  $T^{BC} = 112\text{кн.}$ , эквивалентным действию гребного винта обычного судна. В качестве параметра управления принят параметр  $\gamma_2$  – угол отклонения буксирной связи от направления вектора скорости буксируемого объекта –  $\bar{V}_2$ , совпадающего с направлением касательной к траектории центра тяжести  $G_2$  (рис. 1).

Таблица 1

$\gamma_2$ , град	40	35	30	25	20	15	10	5	3	1	0	-5	-10	-15
$\bar{V}_2$ , м/с	2,86	3,05	3,16	3,30	3,42	3,52	3,63	3,71	3,83	3,81	3,78	3,85	3,63	3,53
$\bar{\omega}_2$ , рад/с	0,552	0,481	0,422	0,367	0,318	0,272	0,229	0,187	-0,117	-0,136	0,144	0,097	-0,229	-0,272
$\beta_2$ , рад	0,259	0,249	0,237	0,227	0,216	0,205	0,193	0,180	-0,152	0,161	0,164	1,142	-0,193	-0,205
$\beta_2$ , град	14,8	14,3	13,6	13,0	12,4	11,7	11,1	10,3	-8,7	-9,2	9,4	8,1	-11,1	-11,7
$\gamma_2^*$ , град	25,2	20,7	16,4	12	7,6	3,3	-1,1	-5,3	11,7	10,2	-9,4	13,1	1,1	-3,3

Начальным положением буксируемого объекта являлось прямолинейное движение со скоростью  $\bar{V}_0$ . В начальный момент времени  $t_0$ , происходило отклонение буксирной связи на заданный угол  $\gamma_2$ . После завершения эволюционного периода, наступала установившаяся циркуляция буксируемого объекта, именно в этот момент параметры движения фиксировались.

В областях умеренных и малых значений  $\gamma_2$ , исследование проводилось путём поша-

гового уменьшения угла в сторону отрицательных значений до тех пор, пока не изменялось направление вращения корпуса. Это соответствует методике, разработанной Регистром при определении первого критического угла перекадки рулей. Таким образом, удалось получить петлю неустойчивости. Результаты расчёта приведены в табл. 1, по ним построена диаграмма управляемости (рис. 5).

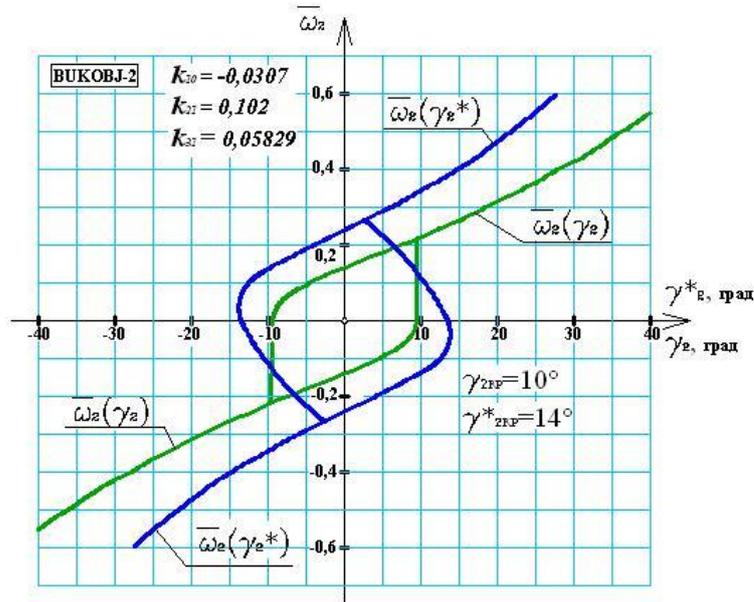


Рис. 5. Диаграмма управляемости буксируемого судна проекта 19610

Таблица 2

$\gamma_2$ , град	50	40	30	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-30
$\bar{V}$ , м/с	2,65	2,95	3,27	3,55	3,69	3,79	3,89	3,97	3,90	3,80	3,70	3,60	3,33
$\bar{\omega}_2$ , рад/с	0,729	0,554	0,411	0,296	0,244	0,194	0,142	0,080	-0,142	-0,194	-0,244	-0,294	-0,404
$\beta_2$ , рад	0,232	0,207	0,180	0,154	0,140	0,123	0,103	0,073	-0,103	-0,123	0,139	-0,154	-0,180
$\beta_2$ , град	13,3	11,7	10,3	8,8	8,0	7,05	5,90	4,2	-5,90	-7,05	-8,0	-8,8	-10,3
$\gamma_2^*$ , град	36,7	28,3	19,7	11,2	7,0	2,95	0,9	-4,2	0,9	-2,95	-7,0	-11,2	-19,7

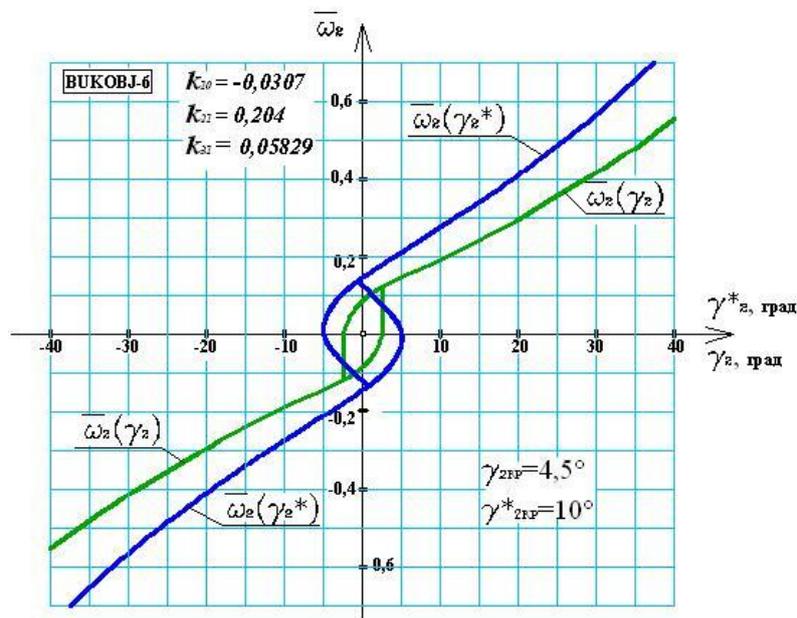


Рис. 6. Влияние гидродинамических характеристик корпуса

Можно утверждать, что при  $\gamma_2 > \gamma_{2KP}$  существует однозначный устойчивый режим движения по криволинейной траектории. Внутри «петли неустойчивости» возможны переходные эволюционные движения. Направления вращения корпуса буксируемого объекта будут неоднозначные, они определяются внешними начальными условиями.

Проведено исследование влияния гидродинамических характеристик корпуса буксируемого объекта на размер «петли неустойчивости». Наиболее эффективно удалось уменьшить размеры «петли неустойчивости», увеличением коэффициента поперечной гидродинамической силы  $k_{21}$ . Результаты расчета приведены в табл. 2, в графической форме - на рис. 6.

Таким образом, использование диаграммы управляемости позволяет обозначить границы устойчивого движения буксируемого объекта по круговой траектории за буксировщиком, а также определить пути расширения этих границ. А предварительное построение траектории движения с использованием диаграммы, определяет необходимую длину буксирной связи, обеспечивающую движение объектов буксирного ордера по одной траектории.

### Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Маневренность судна при знакопеременных переключках рулей / А.Б. Ваганов, П.В. Гуров, А.С. Костюнин // Вестник Иркутского государственного технического университета; Иркутск, 2011. №4(51). С. 66–71.
2. Ваганов, А.Б. Анализ ухудшения маневренности судна при знакопеременных переключках рулей / А.Б. Ваганов, П.В. Гуров, А.С. Костюнин, К.Е. Сазонов // Труды ЦНИИ им. академика А.Н.Крылова; Л., 2012. №1(66). С. 33–42.
3. Ваганов, А.Б. Моделирование движения сложного буксирного состава / А.Б. Ваганов, П.В. Гуров // Наука и технологии. Краткие сообщения XXVII Российской школы, посвященной 150-летию К.Э.Циолковского, 100-летию С.П.Королева и 60-летию Государственного ракетного центра «КБ им. академика В.П. Макеева». 2007. С. 84–86.
4. Маковский, А.Г. Особенности движения буксируемых судов на циркуляции / А.Г. Маковский, Е.Б. Юдин // Судостроение. 1979. №10. С. 11–12.

Дата поступления  
в редакцию 22.01.2015

P.V. Gurov

### USE OF CONTROL CHARTS FOR MOTION ESTIMATION TOWED OBJECT FOR AT TOWING CIRCULAR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

**Objective:** To study the motion of the towed object in a circular path.

**Method:** use mathematical modeling to analyze the motion of the towed object under control action towline.

**Results:** The effect of hydrodynamic characteristics of the hull of the towed object on the size of the "loop instability" in the chart control. Is set, reducing the loop border and increasing range of sustainable movement. The possibility of determining the required length of the towing connection, providing movement of objects towing warrants on the same trajectory.

**Conclusion:** The use of control charts allows you to identify the boundaries of sustainable modes of motion of the towed object on a circular path for towing.

*Key words:* mathematical modeling, towed object graph handling, road holding, the trajectory.