

УДК 629.124: 532

А. Б. Ваганов, А. С. Костюнин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗИГЗАГОБРАЗНЫХ МАНЕВРОВ СУДНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Проведены исследования параметров движения судна при выполнении зигзагообразных маневров на прямом курсе и при совершении поворота. Даны рекомендации по улучшению характеристик таких маневров.

*Ключевые слова:* теоретически неустойчивое судно, зигзагообразный маневр, зигзаг Кемпфа, фазовая траектория зигзага.

Управление судном, не обладающим теоретической устойчивостью на заданном курсе, является сложной задачей. Эффективность ее решения зависит от свойств судна как объекта управления, а также от психофизических качеств рулевого, его опыта, внимательности, степени утомления.

Современные морские суда оснащены авторулевыми, однако при движении по каналам и рекам, при заходах в порт судном управляет человек (рулевой). Речные суда практически всегда управляются рулевым, так как судовой ход ограничен по ширине и извилист. При удержании судна, не обладающего теоретической устойчивостью на прямом курсе, рулевой вынужден постоянно переключать руль на правый и левый борт. Таким же образом приходится управлять судном при движении по сложной траектории. Естественно, что судно при этом совершает зигзагообразные движения. Амплитуда таких движений будет зависеть от опыта и степени утомленности рулевого и, конечно, от свойств судна. При этом становятся важными вопросы: какая будет средняя скорость судна на курсе и какая будет ширина занимаемой полосы судового хода?

Проведенные исследования маневров «зигзаг» в работе [1] показали, что скорость движения судна  $v$  снижается, и степень снижения скорости зависит от  $\Delta\chi_m = f(\alpha_p)$ , где  $\Delta\chi_m$  - среднее значение максимального угла курса при маневре;  $\alpha_p$  - угол переключки руля.

Для ходкости судна важна средняя проекция скорости на направление движения  $v_\xi$ , которая будет еще меньше из-за зигзагообразной формы траектории судна.

Было выполнено моделирование зигзагообразного маневра судна с помощью программы движения для ПЭВМ. Математическая модель управляемости судна и управления рулем при выполнении данного маневра составлена на методической основе и рекомендаций справочников [3, 4], а также учебников по управляемости судов [2, 5].

В качестве базового судна для вычислительных испытаний было выбрано судно, близкое к грузовому судну проекта 19610 со следующими характеристиками:

длина судна  $L = 121$  м;  
ширина судна  $B = 14,8$  м;  
осадка  $d = 3,33$  м.

Для базового судна были проведены систематические расчеты зигзага при варьировании  $\alpha_p = \chi_0 = \pm 3^\circ; \pm 5^\circ; \pm 7,5^\circ; \pm 10^\circ; \pm 15^\circ; \pm 20^\circ$ . Длительность расчетного времени составляла 2000 с, где  $\chi_0$  - угол курса, по достижении которого руль переключается на противоположный борт.

В процессе расчета регистрировались в файле программы следующие результаты:

- угол переключки рулей  $\alpha_p(t)$ ;
- угол курса  $\chi(t)$ ;

- угол дрейфа  $\beta(t)$ ;
- относительная угловая скорость вращения  $\bar{\omega}(t)$ ;
- координаты центра тяжести  $\xi(t), \eta(t)$ ;
- относительная скорость судна  $\bar{v}$ .

Для примера на рис. 1 приведены результаты расчета в форме диаграммы при  $\pm\alpha_p = \pm\chi_0 = 7,5^\circ$ .

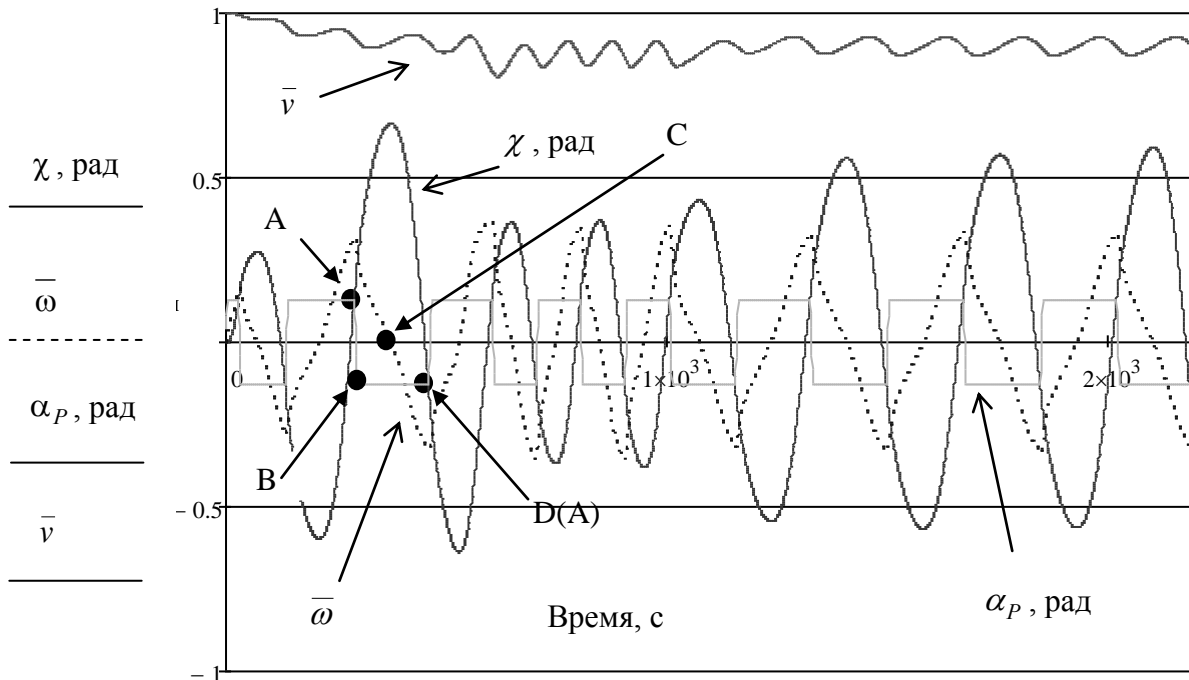


Рис. 1. Параметры зигзага ( $\pm\alpha_p = \pm\chi_0 = 7,5^\circ$ )

При обработке результатов расчетов (табл. 1) отмечены такие параметры:

- $\Delta\chi_m$  - значение максимального угла курса при маневре;
- $\Delta T_m$  - промежуток времени, необходимый для изменения угла курса от максимального угла на один борт до максимального угла на противоположный борт;
- $v_\xi$  - средняя на зигзаге абсолютная скорость судна в направлении курса;
- $\bar{v}_{cp}$  - средняя на зигзаге относительная скорость судна;
- $\Delta\eta$  - значение максимального поперечного смещения судна относительно оси судового хода.

Таблица 1

Параметры зигзага Кемпфа

$\pm\alpha_p = \pm\chi_0, ^\circ$	$\Delta\chi_m, ^\circ$	$\Delta T_m, \text{с}$	$v_\xi, \text{м/с}$	$\bar{v}_{cp}, \text{м/с}$	$\Delta\eta, \text{м}$
3	86	525	1,81	0,94	1260
5	41	249	4,33	0,92	290
7,5	33	171	4,67	0,91	150
10	31	148	4,37	0,88	120
15	33	126	4,10	0,82	100
20	38	121	3,62	0,72	100

Критерии оценки зигзага (табл. 2):

- частота переключений рулей в минуту  $n = \frac{60}{\Delta T_m}$ ;
- потеря скорости  $\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi$ ;
- критерий  $\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$
- ширина занимаемой полосы судового хода  $2 \Delta \eta$ ;

Таблица 2

## Значения критериев оценки зигзагов

$\pm \alpha_P = \pm \chi_0, ^\circ$	$n = \frac{60}{\Delta T_m}, \text{мин}^{-1}$	$\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi, \text{м/с}$	$\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$	$2 \Delta \eta, \text{м}$
3	0,114	3,69	0,67	2520
5	0,241	1,17	0,21	580
7,5	0,351	0,83	0,15	300
10	0,405	1,13	0,20	240
15	0,476	1,40	0,25	200
20	0,500	1,88	0,34	200

Рассмотрение табл. 1-2 показывает, что применение технологии управления судном по типу «зигзага Кемпфа» с параметрами  $\pm \alpha_P = \pm \chi_0$  невыгодно по критериям потери скорости и значительной ширины занимаемой полосы судового хода.

Оптимальным из рассмотренных вариантов следует признать  $\pm \alpha_P = 7,5-10^\circ$ .

Для дальнейшей оптимизации движения судна целесообразно рассмотреть вариант зигзага при  $\pm \chi_0 = 3 \div 5^\circ$ .

Выполнен расчет зигзага с параметрами:  $\pm \alpha_P = 10^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3^\circ$ . Результаты приведены в табл. 3

Таблица 3

Критерии оценки зигзага с параметрами  $\pm \alpha_P = 10^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3$ 

$\pm \alpha_P, ^\circ$	$\pm \chi_0, ^\circ$	$n = \frac{60}{\Delta T_m}, \text{мин}^{-1}$	$\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi, \text{м/с}$	$\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$	$2 \Delta \eta, \text{м}$
10	3	0,50	0,69	0,125	140

На рис. 2 приведена фазовая траектория для данного варианта действий судоводителя. Проанализируем взаимодействие и перегруппировку сил в течение маневра.

Слева и в точке *A* (начало переключки рулей на левый борт рис. 1) позиционный момент  $M_K^{\text{II}}$  совпадает по знаку с углом дрейфа и поворачивает судно вправо. В том же направлении действует момент от рулей. В противоположную сторону направлен демпфирующий (вращательный) момент  $M_K^{\text{II}}$ , имеющий знак, противоположный знаку угловой скорости. Результирующий момент в этих точках вращает корпус вправо.

В точке *B* (окончание переключки рулей на левый борт) позиционный момент  $M_K^{\text{II}}$  по-прежнему поворачивает судно вправо. Момент от рулей изменил знак на противоположный и значительно возрос по величине из-за того, что угол переключки  $-\alpha_P$  совпал по знаку с потерянными углом атаки  $-\beta_P$ . На левый борт по-прежнему направлен демпфирующий (вращательный) момент  $M_K^{\text{II}}$ . Результирующий момент изменяет знак и поворачивает судно влево.

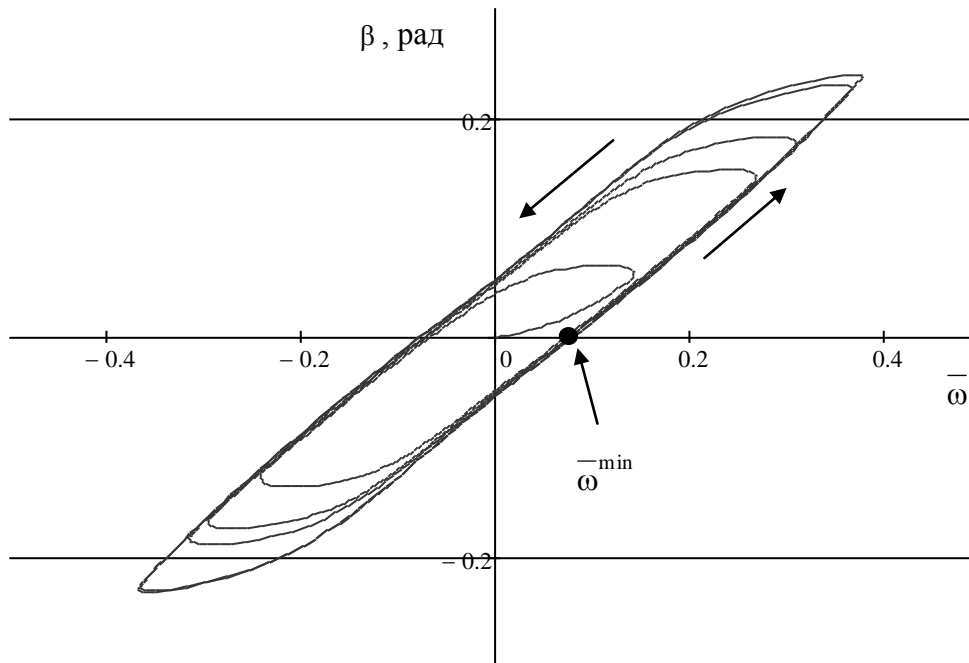


Рис. 2. Фазовая траектория зигзага ( $\pm \alpha_p = 10^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3^\circ$ )

Угловая скорость уменьшается и в точке С становится равной нулю, а угол курса достигает максимума. Далее угловая скорость меняет знак и становится отрицательной. Корпус меняет направление вращения влево, однако угол курса остается положительным, хотя и уменьшается.

В технологии маневра Кемпфа следующая перекладка руля начнется, когда угол курса сменил знак и его величина превысит  $-\chi_0$ . До этого момента корпус будет поворачиваться влево, набирая угловую скорость вращения под действием рулевого момента и позиционного момента, который также будет действовать влево, поскольку угол дрейфа вскоре после прохождения точки С сменил знак с положительного на отрицательный. Происходит своеобразный разгон по вращению до точки D(A) инерцию которого после принятия судоводителем решения об обратной перекладке руля по условию ( $|\chi| > \pm \chi_0$ ) вновь придется гасить рулевым моментом.

С точки зрения устойчивости движения судна на прямом курсе, накопленную на этом этапе кинетическую энергию следует считать вредной и ее следует минимизировать.

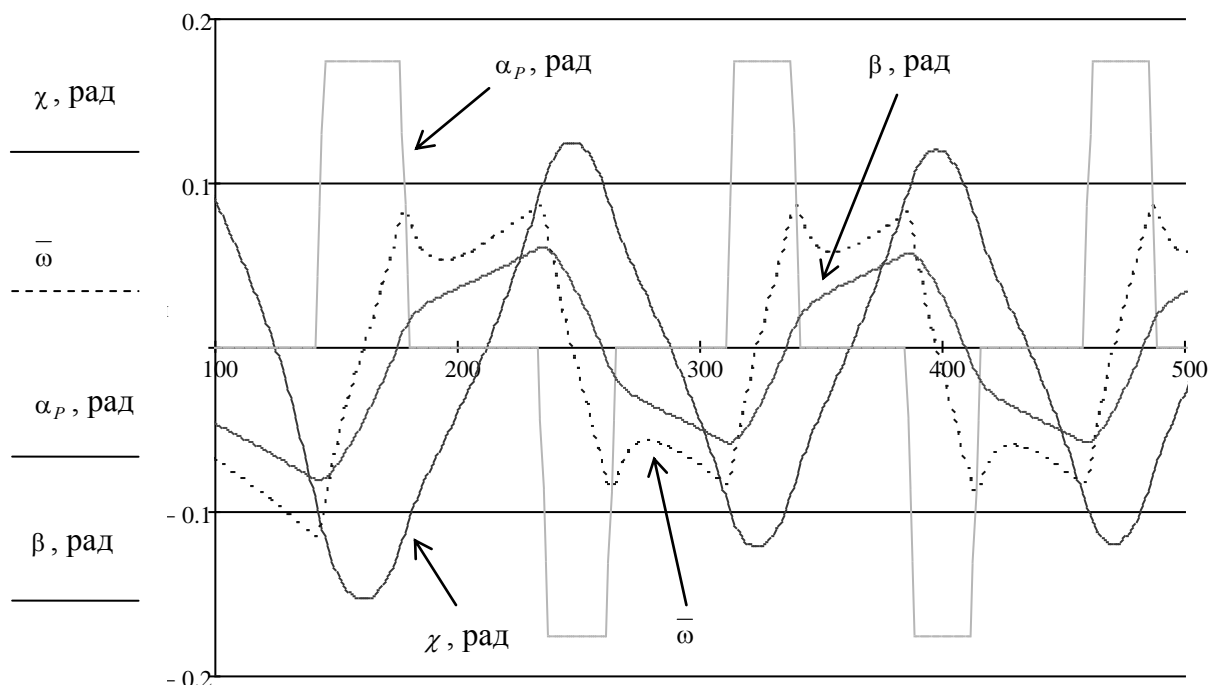
Для этой цели решение об обратной перекладке руля следует принять раньше, например, после смены знака угловой скорости по достижении ей некоторого минимально достаточного значения  $\pm \bar{\omega}^{\min}$ .

Как показывает рассмотрение фазовой траектории  $\beta(\bar{\omega})$ , значение  $\pm \bar{\omega}^{\min}$  можно принять по моменту смены знака угла дрейфа, чтобы не получить возврата судна к прежнему направлению вращения.

Определили по графику  $\beta(\bar{\omega})$  (рис. 2), что для базового судна  $\pm \bar{\omega}^{\min} = 0,078$ .

Можно рекомендовать неопытному рулевому в этот момент положить рули в ДП или  $\alpha_p = 0$ . Это приведет в дальнейшем к уменьшению угловой скорости вращения корпуса. Продолжая вращение корпуса влево, угол курса достигнет значения  $(-\chi_0)$ , и тогда уже рули переключать на правый борт из нуля в положение  $\alpha_p = +\alpha_p$ .

На рис. 3 приведены зависимости параметров такого зигзага, характеризуемого двухступенчатой перекладкой рулей и с выдержкой рулей в нулевом положении.



**Рис. 3. Параметры движения при зигзаге ( $\pm \alpha_p = 10^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3^\circ$ ) с реагированием на  $\pm \bar{\omega}^{\min} = 0,078$**

В табл. 4 приведены параметры данного зигзага.

**Таблица 4**

**Критерии оценки зигзага с параметрами ( $\pm \alpha_p = 10^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3^\circ$ ) с реагированием на  $\pm \bar{\omega}^{\min} = 0,078$**

$\pm \alpha_p, ^\circ$	$\pm \chi_0, ^\circ$	$n = \frac{60}{\Delta T_m}, \text{мин}^{-1}$	$\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi, \text{м/с}$	$\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$	$2 \Delta \eta, \text{м}$
10	3	1,20	0,15	0,027	16

Как показывают расчеты, данный алгоритм с реагированием рулевого на значение угловой скорости вращения корпуса весьма эффективен.

Параметры «зигзага Кемпфа» при совершении поворота судна по курсу:

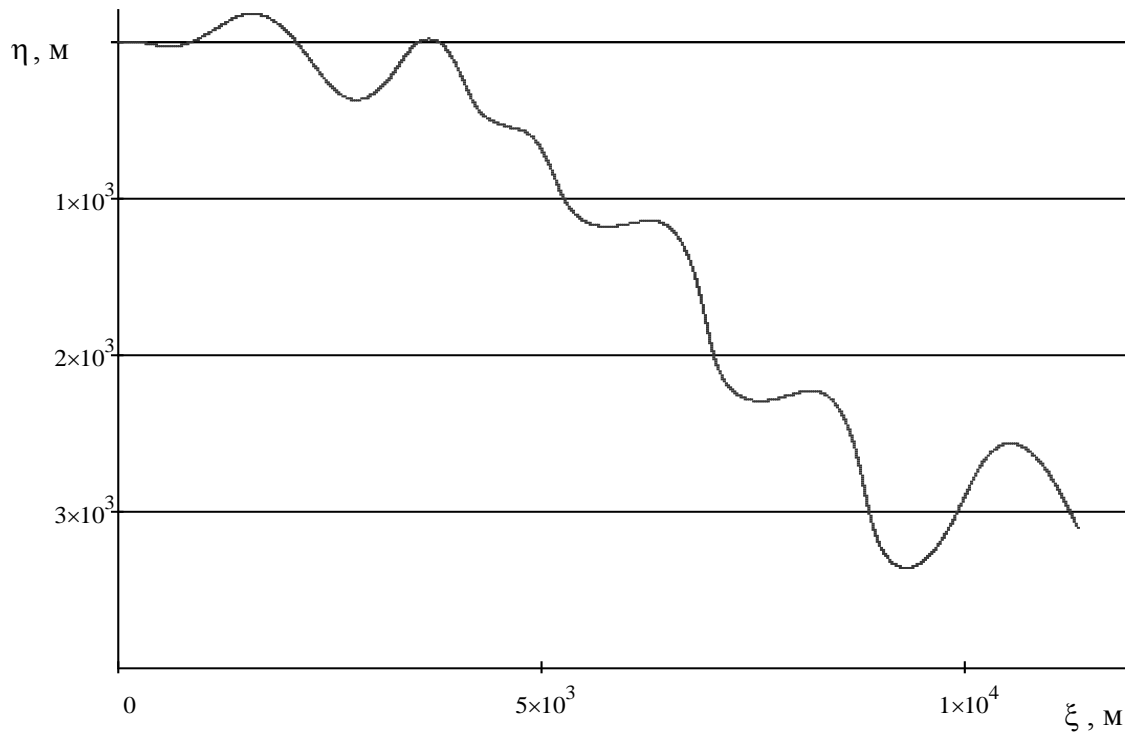
Угол поворота генерального курса приняли  $30^\circ$  на правый борт.

Параметры зигзага приняли следующими:

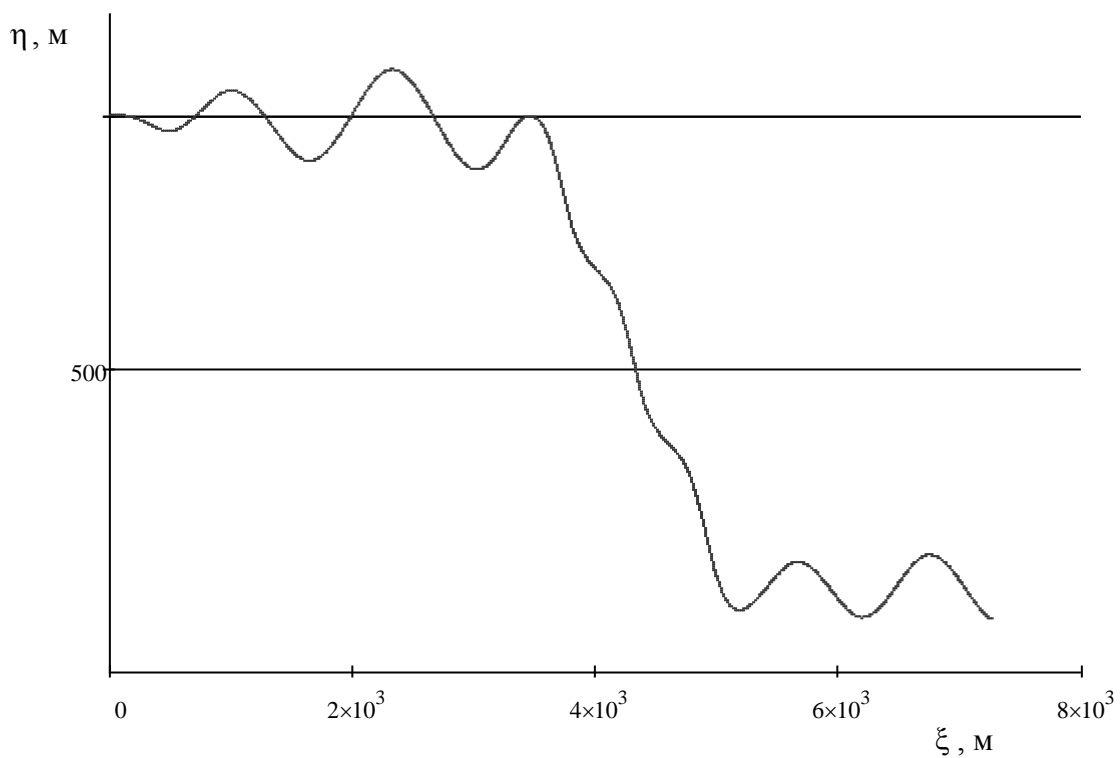
1.  $\pm \alpha_p = 5^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3^\circ$  - зигзаг с малой амплитудой перекладки рулей;
2.  $\pm \alpha_p = 10^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3^\circ$  - зигзаг с оптимальной амплитудой перекладки.

Выполнен расчет данного маневра. В точке принятия решения о повороте на новый курс  $\chi_{00} = 30^\circ$ , через определенное время принималось решение о возвращении на прежний курс  $\chi_{00} = 0^\circ$ . Перекладки рулей  $\pm \alpha_p$ ;  $\pm \chi_0$  осуществлялись так же, как и на прямом курсе.

Траектория поворота при 1-м зигзаге приведена на рис. 4, при 2-м зигзаге – на рис. 5.



**Рис.4. Траектория поворота при зигзаге ( $\pm\alpha_p = 5^\circ$ ;  $\pm\chi_0 = 3^\circ$ )**



**Рис. 5. Траектория поворота при зигзаге ( $\pm\alpha_p = 10^\circ$ ;  $\pm\chi_0 = 3^\circ$ )**

Анализ результатов расчетов показывает, что второй зигзаг более четко выражен и может быть рекомендован судоводителю.

Первый зигзаг характеризуется большими амплитудами отклонения по курсу и как бы размыт, занимая широкую полосу судового хода.

Подтверждаются выводы, сделанные ранее об оптимальных значениях  $\pm \alpha_p = 10^\circ$ ;  $\pm \chi_0 = 3^\circ$  для базового судна.

#### Библиографический список

1. **Ваганов, А.Б.** Анализ управляемости судна при выполнении зигзагообразных маневров / А.Б. Ваганов [и др.] // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: доклады Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию факультета морской и авиационной техники / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева 17-20 ноября 2009 г. - Нижний Новгород, 2009. С. 131-134.
2. **Васильев, А. В.** Управляемость судов / А. В. Васильев. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
3. **Гофман А.Д.** Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания / А.Д. Гофман. – Л.: Судостроение. 1978. – 258 с.
4. **Першиц, Р.Я.** Управляемость и управление судном / Р.Я. Першиц. – Л.: Судостроение. 1983. – 272 с.
5. **Соболев, Г.В.** Управляемость корабля и автоматизация судовождения / Г. В. Соболев. – Л.: Судостроение, 1976. – 477 с.
6. Справочник по теории корабля. В 3т. Т.3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.

*Дата поступления  
в редакцию 29.04.2011*

**A.B. Vaganov, A.S. Kostyunin**

#### RESEARCH OF SHIP'S ZIGZAG MANEUVER

Researches of ship's movement's parameters during zigzag maneuver on straight course and on-turn are made. Recommendations for improvement of such maneuvers are made.

*Key words:* theoretically unstable ship, zigzag maneuver, Kempf zigzag, phase trajectory of zigzag.