

УДК 656.61.052

DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.173-183

## IMITATION DESIGN OF THE COMBINED MANOEUVRE OF DIVERGENCE OF SHIP WITH TWO TARGETS

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ СУДНА С ДВУМЯ ЦЕЛЯМИ

V.E. Pjatakov, *PhD student*

В.Э. Пятаков, *аспирант*

*National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine*

*Національний університет «Одеська морська академія», Україна*

### ABSTRACT

In work is specified, that presently the accident rate of vessels in the straitened waters by reason of collisions remains at high level. In the intensive districts of sailing quite often there are more than two vessels to the situation of simultaneous dangerous rapprochement, when implementation of maneuver of divergence in obedience to the CollReg requirements frequently becomes impossible.

The analysis of the last achievements and publications is produced, in which the decision of the examined problem is begun and produced the selection of parts of general issue unsolved before. At the analysis the basic questions of warning of collision of vessels are lighted up, conception of flexible strategies of divergence is explored, the choice of situation of rapprochement of ship with a target from the great number of standard situations is considered, whereupon determination of strategy of divergence is produced. Principles of locally-independent and external are considered management by vessels in the situation of dangerous rapprochement.

It is shown that the method of choice of the combined maneuvers of divergence of ship with two target before was offered by the change of course and his active braking. For verification of correctness of the offered method the computer program containing the module was developed, by which playing of the chosen maneuver of divergence is produced and is concluded about correctness of the offered method of determination of maneuver of divergence, thus for rotatory motion of vessels a model with permanent angular speed is chosen.

As an example correctness of the offered procedure of choice of maneuver of divergence by the change of course of ship with subsequent diminishment of speed of ship is considered by the active braking. The region of possible maneuvers of divergence by the change of course of ship with subsequent diminishment of his speed by the active braking was formed, which the choice of optimum maneuver of divergence with pointing of course and speed of deviation, and also time of beginning of braking was produced by.

The results of imitation design of process of divergence of ship with two dangerous targets are resulted. It is shown that on the first stage of process of divergence by deviation from the first target by the change of course distance of the

shortest rapprochement is equal maximum – possible distance. Beginning of the active braking of ship for the decline of his speed is produced in the indicated moment of time that is the second stage of process of divergence of ship, during which distance of the shortest rapprochement of ship with the second target is equal to maximum distance of rapprochement.

Thus, the imitation design of the combined maneuver of divergence of ship with two targets showed correctness of method of determination of parameters of the considered maneuver of divergence.

**Keywords:** safety of navigation, warning of collisions, combined maneuver of divergence.

## РЕФЕРАТ

У роботі вказується, що в даний час аварійність суден в обмежених водах унаслідок зіткнень залишається на високому рівні. У інтенсивних районах плавання нерідко виникають ситуації одночасного небезпечного зближення більше двох суден, коли виконання маневру розходження згідно вимогам МППЗС-72 часто стає неможливим.

Проведено аналіз останніх досягнень і публікацій, в яких почато рішення даної проблеми і виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. При аналізі освітлені основні питання попередження зіткнення суден, досліджена концепція гнучких стратегій розходження, розглянуто вибір ситуації зближення судна з цілю з множини стандартних ситуацій, після чого визначається стратегія розходження. Розглянуто принципи незалежного і зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення.

Показано, що раніше був запропонований спосіб вибору комбінованих маневрів розходження судна з двома цілями зміною курсу і його активним гальмуванням. Для перевірки коректності запропонованого способу була розроблена комп'ютерна програма, що містить модуль, за допомогою якого проводиться програвання вибраного маневру розходження і робиться висновок про коректність запропонованого способу визначення маневру розходження, причому для обертального руху суден вибрана модель з постійною кутовою швидкістю.

Розглянуто результати імітаційного моделювання маневрів розходження судна з цілю, розрахованих імітаційною комп'ютерною програмою для вибраної ситуації небезпечного зближення судна з цілю.

Як приклад розглянуто коректність запропонованої процедури вибору маневру розходження зміною курсу судна з подальшим зменшенням швидкості судна активним гальмуванням. Була сформована область допустимих маневрів розходження зміною курсу судна з подальшим зменшенням його швидкості активним гальмуванням, за допомогою якої був проведений вибір оптимального маневру розходження з вказівкою курсу і швидкості ухилення, а також часу початку гальмування.

Приведені результати імітаційного моделювання процесу розходження судна з двома небезпечними цілями. Показано, що на першому етапі процесу

розходження ухиленням від першої цілі зміною курсу дистанція найкоротшого зближення рівна гранично – допустимій дистанції. У вказаний момент часу починається активне гальмування судна для зниження його швидкості, що є другим етапом процесу розходження судна, протягом якого дистанція найкоротшого зближення судна з другою цілю дорівнює граничній дистанції зближення.

Таким чином, імітаційне моделювання комбінованого маневру розходження судна з двома цілями показало коректність методу визначення параметрів розглянутого маневру розходження.

**Ключові слова:** безпека судноводіння, попередження зіткнень, комбінований маневр розходження.

### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами**

В настоящее время аварийность судов в стесненных водах по причине столкновений остается на высоком уровне. В интенсивных районах плавания нередко возникают ситуации одновременного опасного сближения более двух судов, когда выполнение маневра расхождения согласно требованиям МППСС-72 зачастую становится невозможным. Поэтому разработка комбинированного маневра расхождения судна с двумя целями является актуальным и перспективным направлением научных исследований.

### **Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы**

В работе [1] предлагаются методы теории оптимальных дискретных процессов для описания процесса расхождения, а метод нелинейной интегральной инвариантности для формализации процесса расхождения предлагается в работе [2].

Принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов и анализ методов их реализации рассмотрены в работе [3], а в работе [4] предложен метод формирования гибких стратегий расхождения.

В работе [5] излагается теоретическое обоснование автономной судовой системы уклонения от столкновения СА. Совместно с алгоритмом по уклонению от столкновения рассмотрены дополнительно Правила уклонения от столкновения COLREG. Также рассматриваются требования к автономной навигации, учитывающие факторы, которые влияют на процесс уклонения от столкновения. Отмечается, что исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены классическим подходом, основанным на математических моделях и алгоритмах, или компьютерной технологией, использующую искусственный интеллект. Причем областью искусственного интеллекта для систем автономного уклонения от столкновения, рассматриваемых в статье, являются эволюционные алгоритмы, логика фуззи,

экспертные методы, нейросеть и комбинация этих методов -гибридные системы.

Экстренная стратегия расхождения в ситуации чрезмерного сближении судов предложена в работе [6]. Взаимодействие судов в ситуации опасного сближения исследовано в работе [7] и предложена процедура выбора стратегии расхождения для предупреждения их столкновения, а процедура выбора оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрена в работе [8]. Вопросы учета навигационных опасностей и инерционности судна при выборе стратегии расхождения судна освещены в работах [9, 10].

### **Формулирование целей статьи (постановка задачи)**

Целью данной статьи является описание результатов имитационного моделирования комбинированного маневра расхождения судна с двумя целями.

### **Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов**

В работе [11] предложен способ выбора комбинированных маневров расхождения судна с двумя целями изменением курса и его активным торможением, суть которого заключается в следующем.

Судно с параметрами движения  $K_c$  и  $V_c$  в начальный момент времени опасно сближается с двумя целями, параметры движения которых  $K_1$ ,  $V_1$ ,  $K_2$  и  $V_2$ . Начальная относительная позиция судна и целей характеризуется дистанциями  $D_1$ ,  $D_2$  и пеленгами  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ . Движение судна относительно целей характеризуется относительными курсами  $K_{oto1}$  и  $K_{oto2}$ .

Для данной ситуации рассмотрим комбинированный маневр расхождения судна с целями последовательно изменением курса для уклонения от первой (ближайшей) цели и активным торможением, пропуская вторую цель.

Безопасный относительный курс уклонения относительно первой ближайшей цели определяется по формуле:

$$K_{oty11}^{(s,p)} = \alpha_1 \pm \arcsin\left(\frac{D_d}{D_1}\right),$$

которому соответствует истинный курс [3]:

$$K_y^{(s,p)} = K_{oty11}^{(s,p)} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_1 - K_{oty11}^{(s,p)})],$$

где  $\rho = \frac{V_c}{V_1}$ .

Приращения относительных координат  $\Delta x_{ot1}$  и  $\Delta y_{ot1}$  между судном, которое поворачивается с угловой скоростью  $a_{\omega}$ , и первой целью выражаются следующим образом:

$$\Delta x_{ot} = \frac{V_c}{a_{\omega}} (\cos K_c - \cos K_y) - V_1 \frac{K_y - K_c}{a_{\omega}} \sin K_1,$$

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_c}{a_{\omega}} (\sin K_y - \sin K_c) - V_1 \frac{K_y - K_c}{a_{\omega}} \cos K_1,$$

где первая составляющая - криволинейное движение судна при повороте, а вторая составляющая - прямолинейное движение цели без изменения параметров движения.

Момент времени  $t_y$  завершения расхождения с первой целью и начала торможения для расхождения со второй целью определяется как момент времени достижения траверзного расстояния с первой целью, т. е.:

$$t_y = \frac{D_{1y} \cos[\alpha_{1y} - K_{oty11}^{(s,p)}]}{V_{oty11}^{(s,p)}},$$

где  $\alpha_{y1}$  и  $D_{y1}$  - пеленг и расстояние до первой цели на момент времени завершения поворота судна, которые учитывают приращения относительных координат  $\Delta x_{ot1}$  и  $\Delta y_{ot1}$ ;

$V_{oty11}^{(s,p)}$  - относительная скорость сближения судна с первой целью на участке уклонения.

Маневр скоростью для расхождения со второй целью производится следующим образом. Задаемся начальными координатами судна  $X_c, Y_c$  и второй цели  $X_2, Y_2$ , исходя из их относительной позиции на момент времени  $t_y$ , после чего проверяем возможность безопасного расхождения остановкой судна в результате торможения. Для этого определяем выбег судна  $S$  и интервал времени  $\tau$  до остановки судна для активного торможения. Затем определяется дистанция кратчайшего сближения  $D_{min2f}$ .

Если  $D_{min2f} \geq D_d$ , то безопасное расхождение со второй целью остановкой судна возможно. Более того, возможно расхождение снижением скорости до значения  $V_{cy}$ , которое обеспечивает равенство:

$$D_{min2f}(V_{cy}) = D_d.$$

В этом случае для активного торможения сниженному значению скорости соответствуют продолжительность переходного процесса  $\tau(V_{cy})$  и пройденное за это время расстояние  $S(V_{cy})$ , которые определяются выражениями [12]:

$$\tau(V_{cy}) = \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \left[ \arctg\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_c\right) - \arctg\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_{cy}\right) \right],$$

$$S(V_{cy}) = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_c^2 + \frac{P}{\mu}}{V_{cy}^2 + \frac{P}{\mu}} \right|,$$

где  $(1+k)m$  - масса судна с присоединенными массами воды;

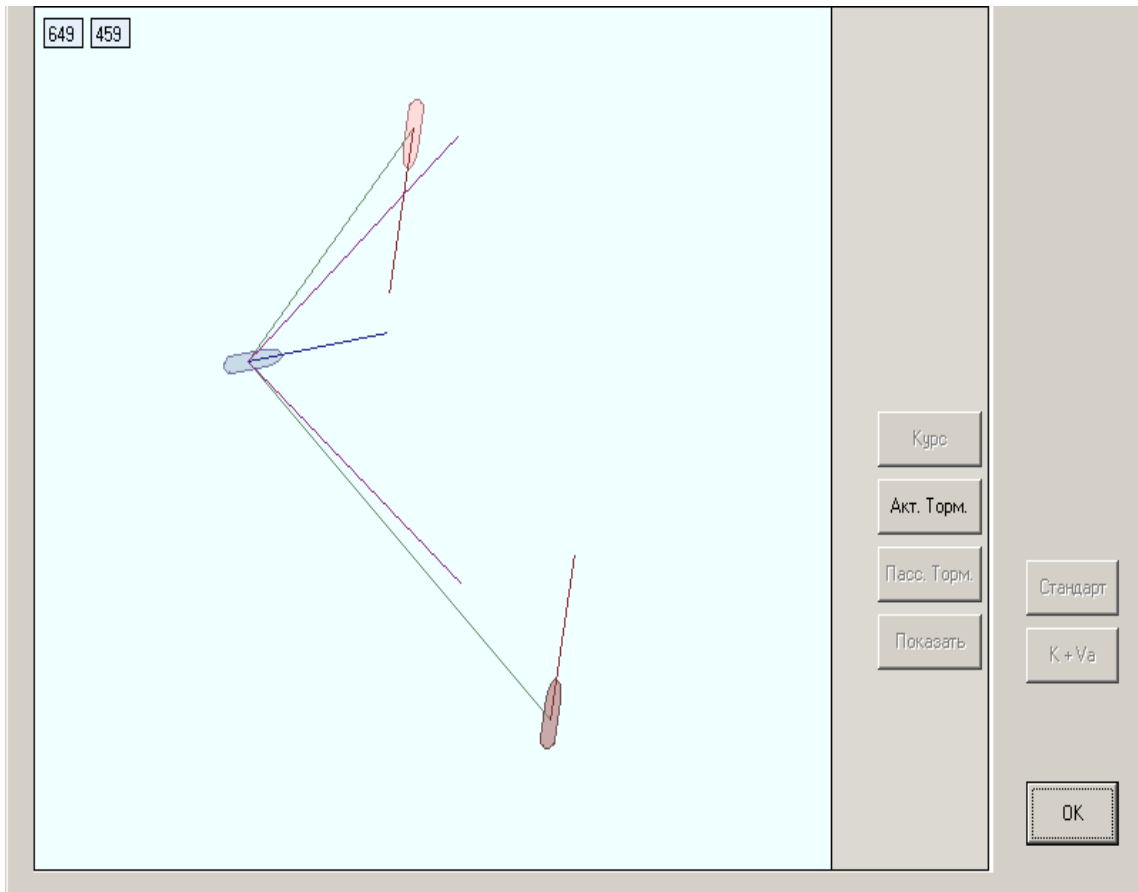
$P$  - упор винта;

$\mu$  - коэффициент сопротивления.

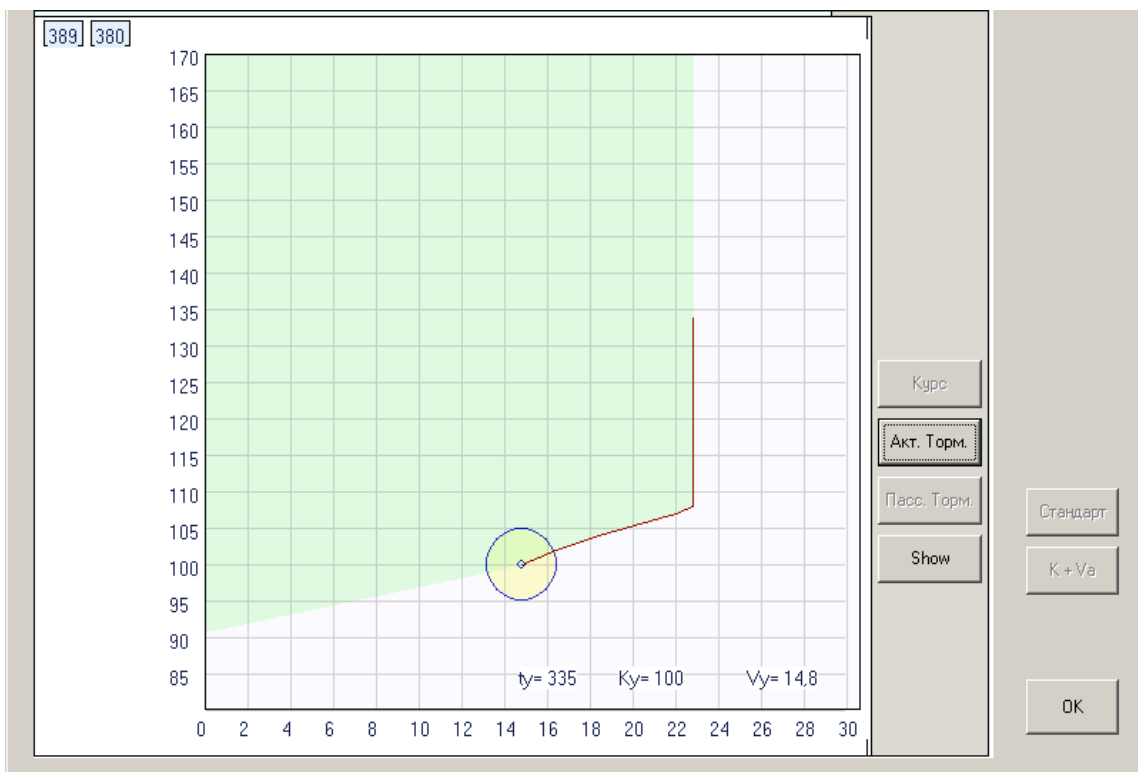
Для различных курсов уклонения  $K_y^{(s,p)}$ , и соответствующих им скоростей на плоскости  $K_y^{(s,p)} \times V_{cy}$  получаем границу области допустимых комбинированных маневров  $\nabla_{K_1, V_2}$ , позволяющей оперативно выбрать безопасный комбинированный маневр расхождения.

Для проверки корректности предложенного способа была разработана компьютерная программа, содержащая модуль, с помощью которого производится проигрывание выбранного маневра расхождения и делается заключение о корректности предложенного способа определения маневра расхождения, причем для вращательного движения судов выбрана модель с постоянной угловой скоростью.

Для примера рассмотрим корректность предложенной процедуры выбора маневра расхождения изменением курса судна с последующим уменьшением скорости судна активным торможением. Для этого выбираем начальную ситуацию опасного сближения, которая характеризуется следующими параметрами: курсом  $K_c = 80^\circ$  и скоростью  $V_c = 23$  узла судна, курсом  $K_1 = 190^\circ$  и скоростью  $V_1 = 20$  узлов первой цели, курсом  $K_2 = 10^\circ$  и скоростью  $V_2 = 21$  узел второй цели, дистанция  $D_1 = 3$  мили и пеленг  $\alpha_1 = 40^\circ$  первой цели, дистанция  $D_2 = 5$  мили и пеленг  $\alpha_2 = 135^\circ$  второй цели. Указанная ситуация показана на рис. 1. На рис. 2 показана область допустимых маневров расхождения изменением курса судна с последующим уменьшением его скорости активным торможением и выбор оптимального маневра расхождения.



*Рис. 1. Исходная ситуация опасного сближения*



*Рис. 2. Выбор оптимального маневра расхождения*

Из рисунка следует, что параметрами маневра являются курс уклонения  $K_y = 100^\circ$ , скорость  $V_y = 14,8$  узла и время начала торможения  $t_y = 335$  с.

Проигрывание маневра расхождения происходит при нажатии клавиши «TIMER», при этом инициализируются информационные панели текущего времени моделируемого процесса расхождения и параметров движения судна, а на нижних информационных панелях выводятся текущие значения дистанций до целей. При этом начинается проигрывание маневра расхождения.

Через 5 с после начала проигрывания маневра расхождения судно начинает поворот на курс уклонения от первой цели, а момент времени окончания поворота показан на рис. 3. После поворота судно следует неизменным курсом уклонения, сближаясь с первой целью. В момент кратчайшего сближения на 285 с процесса расхождения дистанция до первой цели равна 1,002 мили, т. е. предельно – допустимой дистанции, следовательно, расхождение судна с первой целью является безопасным, что иллюстрируется рис. 4. Для расхождения со второй целью в момент времени 335 с судно начинает снижать скорость активным торможением до значения 14,8 узлов. Эта скорость достигается на 428 с (рис. 5), судно завершает процесс торможения и продолжает движение с данной скоростью до кратчайшего сближения со второй целью.

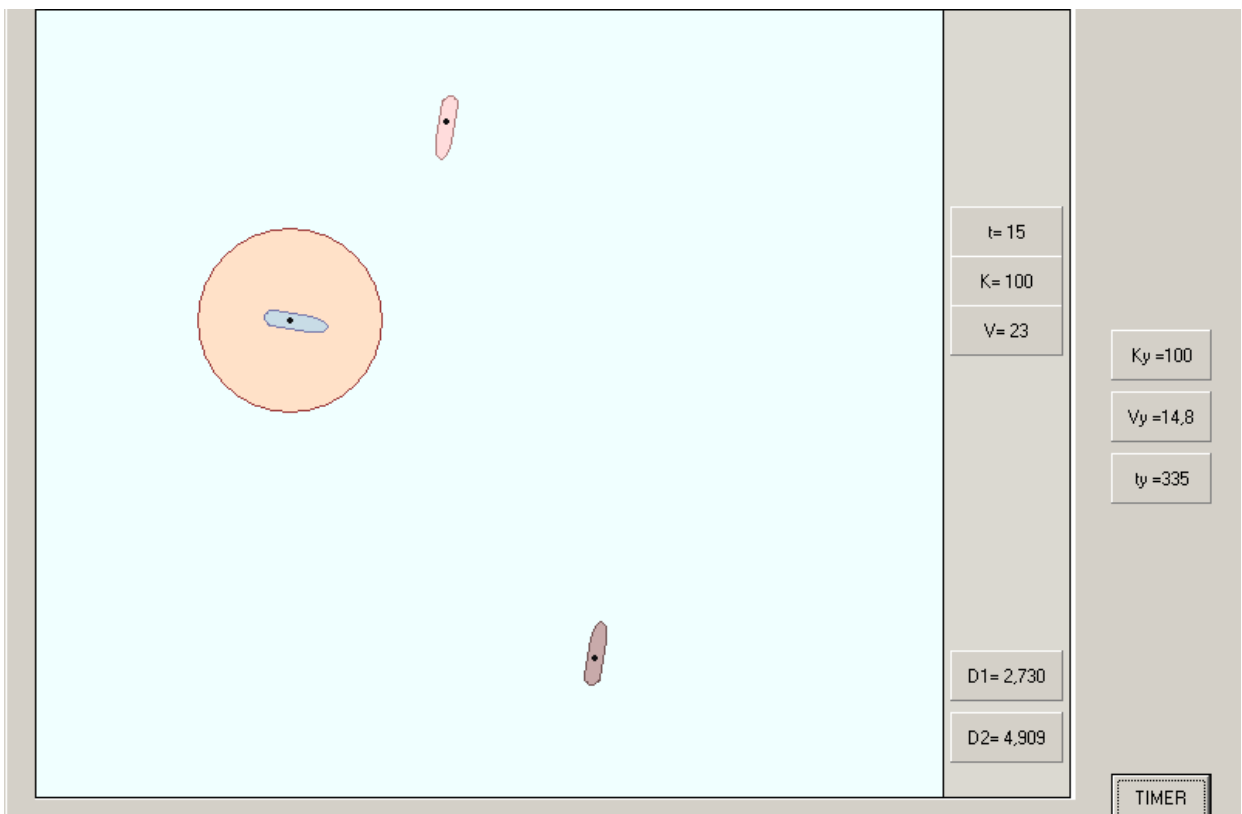


Рис. 3. Завершение поворота на курс уклонения



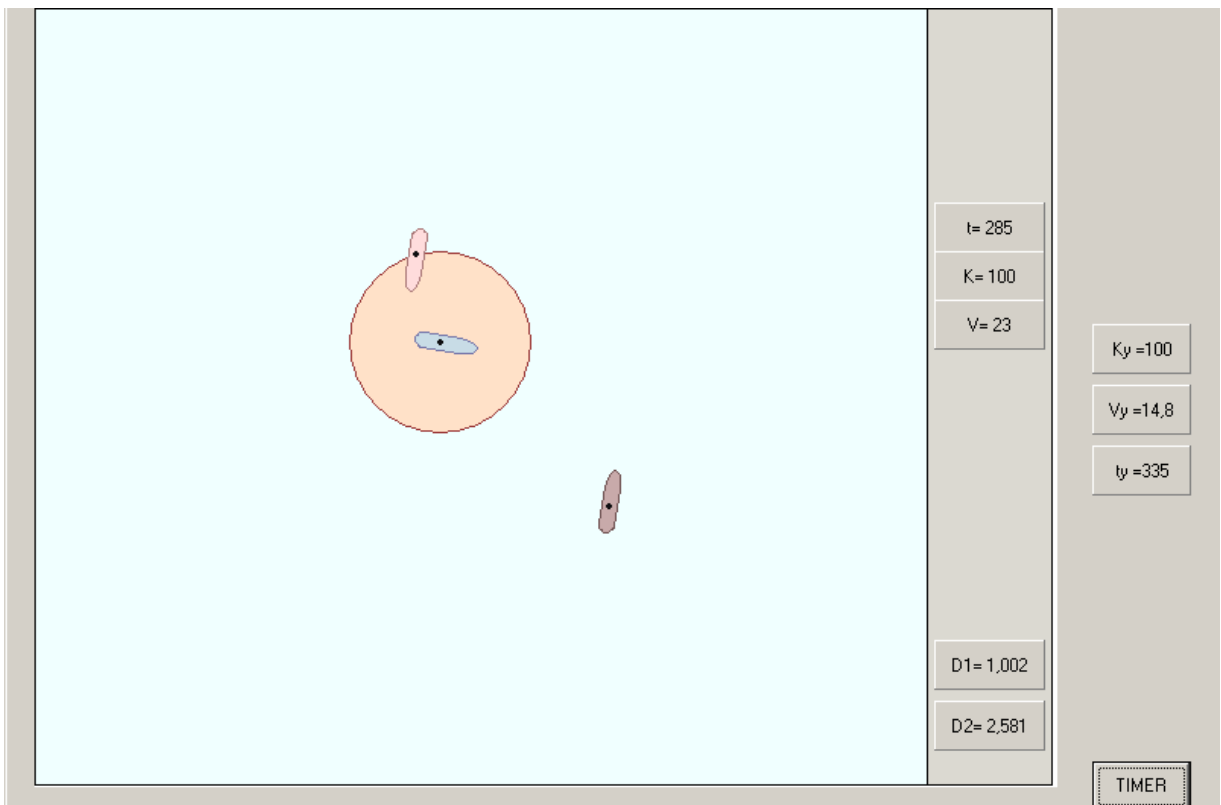


Рис. 4. Ситуация кратчайшего сближения с первой целью

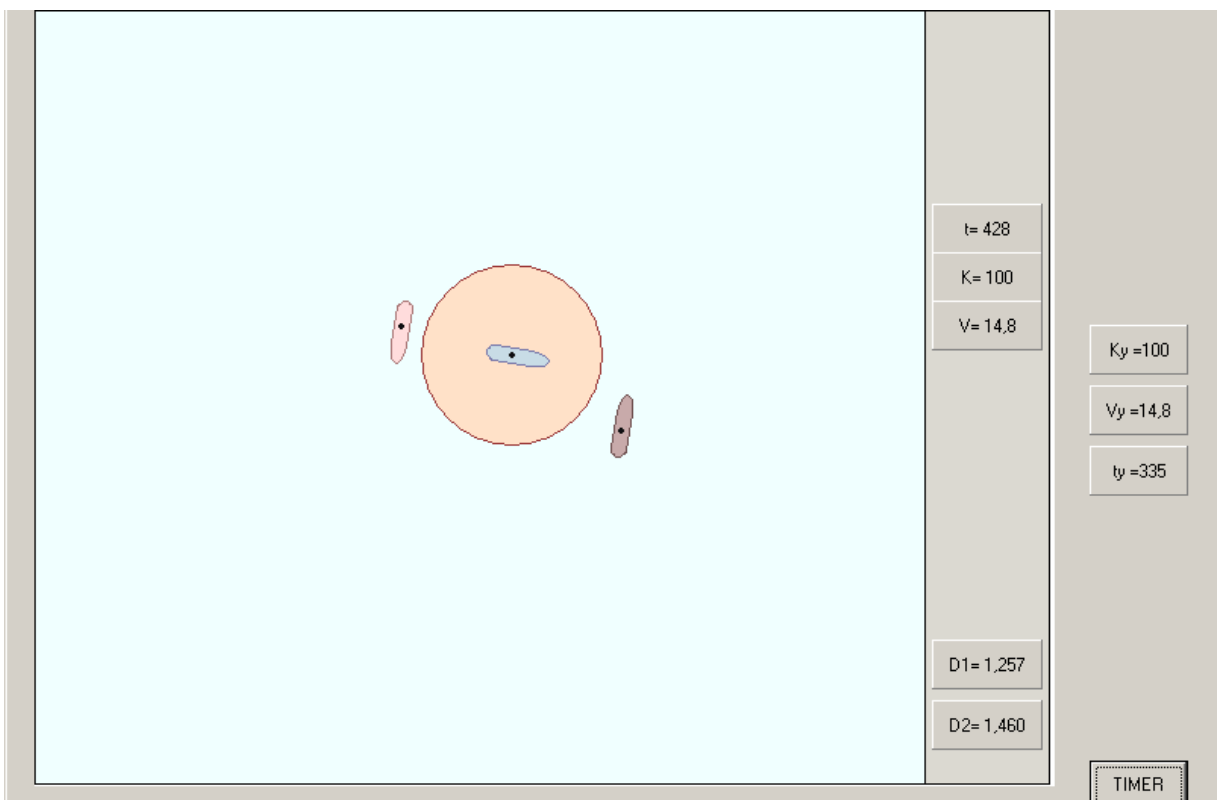
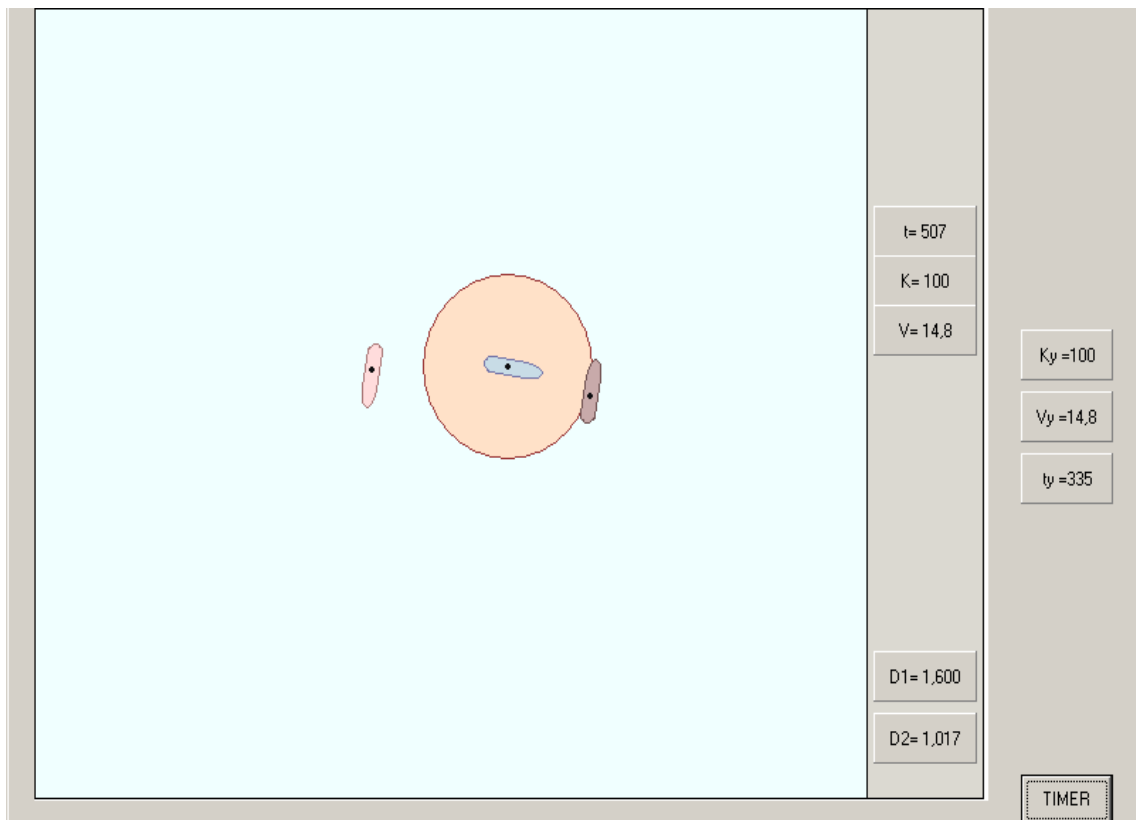


Рис. 5. Момент окончания активного торможения

На 507 с процесса расхождения судно сближается на минимальную дистанцию со второй целью, которая, как следует из рис. 6, равна 1,017 мили, что обеспечивает судну безопасное расхождение со второй целью.



*б. Ситуация кратчайшего сближения со второй целью*

### **Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению**

Таким образом, имитационное моделирование комбинированного маневра расхождения судна с двумя целями показало корректность метода определения параметров рассмотренного маневра расхождения. В дальнейшем целесообразно произвести имитационное моделирование других типов комбинированного маневра расхождения судна.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
2. Павлов В.В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ В.В. Павлов, Н.И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. - № 68. - С. 43-45.
3. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.
4. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
5. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.

6. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
7. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
8. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / И.В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
9. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
10. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103 - 107.
11. Пятаков В.Э. Анализ области допустимых комбинированных маневров расхождения судна с двумя целями изменением курса и его активным торможением. /Пятаков В.Э.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 53 - 58.
12. Демин С.И. Торможение судна / С. И. Демин– М.: Транспорт, 1975. – 81с.