

## TECHNICAL SCIENCES

### Автоматическое определение параметров оптимальной стратегии расхождения судов при снижении их скоростей на постоянных курсах

Д. Б. Федоров, И. А. Бурмака

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина  
Corresponding author. E-mail: burmaka1964@gmail.com

Paper received 10.01.21; Accepted for publication 24.01.21.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2021-250IX31-07>

**Аннотация.** Рассмотрен метод автоматического выбора оптимальной стратегии расхождения судов при снижении их скоростей на постоянных курсах. Приведен пример опасной ситуации сближения судов и выбор оптимальной стратегии их расхождения снижением скоростей активным торможением. Произведено имитационное моделирование маневра расхождения, подтверждающее корректность предложенного метода.

**Ключевые слова:** безопасность судовождения, расхождение судов при опасном сближении, маневр расхождения активным торможением, имитационное моделирование.

**Введение.** В стесненных водах возрастает риск возникновения аварий судов из-за интенсивного судоходства и навигационных опасностей. Поэтому стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением оборудуются станциями управления движением судов, которые помимо контроля процесса судовождения обеспечивают его безопасность, предупреждая столкновения судов в ситуациях опасного сближения, что требует разработки методов безопасного расхождения внешним управлением.

Существенной причиной, ведущей к возникновению угрозы столкновения судов, является субъективность оценки ситуаций сближения и принятия решений по предупреждению столкновения. Поэтому для снижения влияния человеческого фактора в ситуациях опасного сближения целесообразно автоматизировать определение параметров оптимальной стратегии расхождения судов, чему посвящена данная публикация.

**Краткий обзор публикаций по теме.** Проблеме предупреждения столкновений судов посвящены многочисленные работы ученых разных стран, в которых предложены различные методы выбора маневра расхождения. Формализация процесса расхождения методом нелинейной интегральной инвариантности предложена в работе [1], а описание процесса расхождения методами теории оптимальных дискретных процессов представлено в работе [2]. Работа [3] посвящена процедуре выбора оптимального стандартного маневра расхождения пары судов.

Взаимодействие судов в ситуации опасного сближения и выбор стратегии расхождения для предупреждения их столкновения рассмотрены в работе [4], а в работе [5] освещены вопросы учета инерционности судна при выборе его стратегии расхождения.

В работе [6] излагается теоретическое обоснование автономной судовой системы уклонения от столкновения и рассматриваются требования к автономной навигации. Показано, что исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены компьютерной технологией, которая использует искусственный интеллект.

Ситуация чрезмерного сближения судов и экстренное расхождение рассмотрены в работе [7], а в работе

[8] представлены способы формализации навигационных опасностей и их учет при выборе стратегии расхождения судов. В работе [9] исследованы принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов, а также приведен подробный анализ методов их реализации.

**Цель.** Цель настоящей статьи - разработка метода автоматического определения параметров оптимальной стратегии расхождения судов при снижении их скоростей на постоянных курсах.

**Материалы и методы.** В работе [9] для внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов рассмотрены области опасных значений скоростей и получены уравнения для их границ, как зависимость скорости одного судна от скорости второго, причем выражение для верхней границы:

$$V_1^* = V_2 \sin(K_2 - \gamma^*) / \sin(K_1 - \gamma^*),$$

где  $\gamma^* = \alpha - \arcsin(d_d/D)$ .

Нижняя граница выражается аналогично:

$$V_{1*} = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)},$$

где,  $\gamma_* = \alpha + \arcsin(d_d/D)$ .

Очевидно, при постоянных значениях курсов  $K_1, K_2$  и параметров  $\gamma^*, \gamma_*$  границы опасной области скоростей являются линейными. На рис. 1 показана область недопустимых скоростей для пары опасно сближающихся судов, курсы которых являются неизменными.

Определение маневра расхождения с помощью области опасных скоростей судов осуществляется оператором и, как показано в работе [9], требует значительного времени. Данные обстоятельства снижают безопасность выбранного маневра расхождения, поэтому для устранения упомянутых недостатков целесообразно разработать процедуру автоматического определения параметров маневра расхождения судов изменением их скоростей.

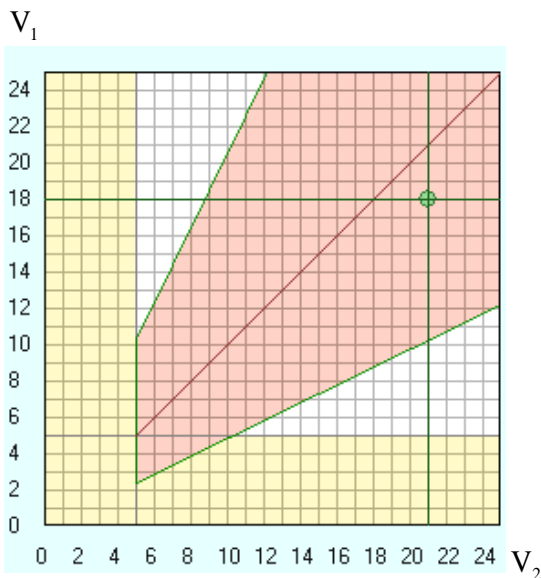


Рис. 1. Область опасных скоростей судов

**Результаты и их обсуждение.** Для выбора безопасного маневра расхождения при его внешнем управлении торможением обоих судов следует в начальный момент времени  $t_n = 0$  начать торможение обоих судов (активное или пассивное) до скоростей расхождения  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$ , которые необходимо определить и они должны минимально отличаться от начальных значений соответствующих скоростей  $V_1$ ,  $V_2$ .

Выбор скоростей расхождения  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$  производится таким образом, чтобы достигалось равенство дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y})$  с предельно-допустимой дистанцией сближения  $D_d$ , т. е.  $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$ , к моменту времени окончания переходного процесса, совпадающего с моментом времени кратчайшего сближения.

Значения скоростей  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$  являются меньшими, чем их начальные значения  $V_1$  и  $V_2$ , т. к. маневр расхождения судов изменением скоростей выполняется их торможением, и суда с пониженными скоростями следуют до момента времени кратчайшего сближения, после чего увеличивают скорости до начальных значений.

Предположим, начальная ситуация опасного сближения судов для начального момента времени  $t_0 = 0$  характеризуется пеленгом  $\alpha_0$  и дистанцией  $D_0$ . Так как пеленг  $\alpha_0$  задается с первого судна на второе, то для первого судна целесообразно принять начальные координаты  $X_{10} = 0$  и  $Y_{10} = 0$ . Тогда начальные координаты второго судна имеют значения  $X_{20} = D_0 \sin \alpha_0$  и  $Y_{20} = D_0 \cos \alpha_0$ .

В дальнейшем при движении судов их координаты  $X_{1t}$ ,  $Y_{1t}$ ,  $X_{2t}$  и  $Y_{2t}$ , а также текущие значения

дистанции  $D_t$  и пеленга  $\alpha_t$  изменяются. Через  $S_{\text{мх}}$  обозначим судно, переходной период изменения скорости которого больше или равный длительности общего переходного процесса  $t_p$ . Судно с меньшим переходным периодом обозначим  $S_{\text{мн}}$ . Если время начала маневра расхождения  $t_n$  равно начальному моменту времени  $t_0$ , то суда в течение переходного процесса  $t_p$  проходят дистанции:

$$D_{\text{мх}} = S_{\text{мх}}, D_{\text{мн}} = S_{\text{мн}} + V_{\text{мн}y}(t_p - \tau_{\text{мн}}),$$

где  $S_{\text{мх}}$  и  $S_{\text{мн}}$  - расстояния, которые проходят соответственно суда  $S_{\text{мх}}$  и  $S_{\text{мн}}$  за время изменения скоростей  $\tau_{\text{мх}}$  и  $\tau_{\text{мн}}$ .

К моменту времени окончания общего переходного процесса  $t_p$  координаты судов  $X_{\text{мх}p}$ ,  $Y_{\text{мх}p}$ ,  $X_{\text{мн}p}$  и  $Y_{\text{мн}p}$  определяются следующими выражениями:

$$X_{\text{мх}p} = D_{\text{мх}} \sin K_{\text{мх}} = S_{\text{мх}} \sin K_{\text{мх}};$$

$$Y_{\text{мх}p} = D_{\text{мх}} \cos K_{\text{мх}} = S_{\text{мх}} \cos K_{\text{мх}};$$

$$X_{\text{мн}p} = D_{\text{мн}} \sin K_{\text{мн}} = [S_{\text{мн}} + V_{\text{мн}y}(t_p - \tau_{\text{мн}})] \sin K_{\text{мн}};$$

$$Y_{\text{мн}p} = D_{\text{мн}} \cos K_{\text{мн}} = [S_{\text{мн}} + V_{\text{мн}y}(t_p - \tau_{\text{мн}})] \cos K_{\text{мн}}.$$

Выражения пеленга  $\alpha_p$  и дистанции  $D_p$  на момент времени окончания общего переходного процесса  $t_p$  имеют вид:

$$D_p = \sqrt{(X_{\text{мх}p} - X_{\text{мн}p})^2 + (Y_{\text{мх}p} - Y_{\text{мн}p})^2},$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{\text{мх}p} - X_{\text{мн}p}}{D_p}.$$

В момент времени окончания переходного процесса  $t_p$  скорости движения обоих судов, как и относительный курс  $K_{\text{отр}}$ , становятся постоянными, а величина дистанции кратчайшего сближения судов  $D_{\min}$  рассчитывается с помощью формулы:

$$D_{\min} = \Delta_p D_p \sin(K_{\text{отр}} - \alpha_p),$$

$$\text{где } \Delta_p = \text{sign}[\sin(K_{\text{отр}} - \alpha_p)].$$

Задаваясь значением скорости  $V_{1y}$  первого судна, рассчитываем значение скорости  $V_{2y}$  второго судна, при которой вычисленное значение  $D_{\min}$  равно величине  $D_d$ . В случае  $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) < D_d$  безопасное расхождение судов скоростью  $V_{1y}$  невозможно.

При выполнении маневра расхождения изменением скоростей пары судов рассмотрим вариант, когда оба судна используют активное торможение.

В этом случае величины  $\tau_{1y}$ ,  $\tau_{2y}$ ,  $S_1$  и  $S_2$  первого и второго судов рассчитываются по формулам, приведенным в работе [9]:

$$\begin{aligned} \tau_{1y} &= \frac{m_1}{\mu V_{yp1}} \left[ \arctg \frac{V_1}{V_{yp1}} - \arctg \frac{V_{1y}}{V_{yp1}} \right], \\ \tau_{2y} &= \frac{m_2}{\mu V_{yp2}} \left[ \arctg \frac{V_2}{V_{yp2}} - \arctg \frac{V_{2y}}{V_{yp2}} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Расстояния  $S_1$  и  $S_2$  их торможения рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{m_1}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + V_{yp1}^2}{V_{1y}^2 + V_{yp1}^2} \right|, \\ S_2 &= \frac{m_2}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2 + V_{yp2}^2}{V_{2y}^2 + V_{yp2}^2} \right|. \end{aligned} \quad (2)$$

Путем сравнения полученных величин  $\tau_{1y}$  и  $\tau_{2y}$ , определяются координаты судов  $X_{mxp}$ ,  $Y_{mxp}$ ,  $X_{mnp}$  и  $Y_{mnp}$ . В случае справедливости неравенства  $\tau_{1y} > \tau_{2y}$  получаем:

$$\begin{aligned} \tau_{mx} &= \tau_{1y}, \tau_{mn} = \tau_{2y}, S_{mx} = S_1, S_{mn} = S_2, \\ V_{mx} &= V_1, V_{mn} = V_2, V_{mny} = V_{2y}, K_{mx} = K_1, \\ K_{mn} &= K_2. \end{aligned}$$

Если же  $\tau_{1y} < \tau_{2y}$ , то имеем:

$$\begin{aligned} \tau_{mx} &= \tau_{2y}, \tau_{mn} = \tau_{1y}, S_{mx} = S_2, S_{mn} = S_1, \\ V_{mx} &= V_2, V_{mn} = V_1, V_{mny} = V_{1y}, K_{mx} = K_2, \\ K_{mn} &= K_1. \end{aligned}$$

С помощью полученных параметров, задавая скоростью  $V_{1y}$ , начиная со скорости  $V_{2y} = V_2$  и уменьшая ее в каждом цикле на выбранное значение  $\Delta V_{2y}$ , рассчитываются значения  $D_{mx}$  и  $D_{mn}$ , а затем – дистанция кратчайшего сближения  $D_{min}$ , которая сравнивается с предельно-допустимой дистанцией  $D_d$ . Циклические повторения вычислений продолжаются до тех пор, пока не наступит равенство  $D_{min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$ , которое определяет искомое значение  $V_{2y}$ . Значения скорости  $V_{1y}$  задаются из диапазона  $V_{1y} \in [V_1, V_{1min}]$ , где  $V_{1min}$  – минимальная скорость, при которой управляется судно. По описанному алгоритму для каждого значения скоро-

сти  $V_{1y}$  из указанного диапазона рассчитывается скорость  $V_{2y}$ , удовлетворяющая равенству  $D_{min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$ , в результате чего получим безопасный маневр расхождения судов с учетом инерционно-тормозных характеристик их торможения. Для каждого из безопасных маневров расхождения судов рассчитываем приращения скоростей  $\Delta V_1 = V_1 - V_{1y}$  и  $\Delta V_2 = V_2 - V_{2y}$ , а также критерий оптимальности  $Q = \Delta V_1^2 + \Delta V_2^2$ .

Как раньше упоминалось, из диапазона  $[V_1, V_{1min}]$  задается скорость  $V_{1y}$ , начиная из  $V_{1y} = V_1$ , для которой по ранее описанному алгоритму определяется скорость  $V_{2y}$  и для полученного маневра расхождения  $(V_{1y}, V_{2y})$  рассчитывается критерий оптимальности  $Q$ . Затем скорость  $V_{1y}$  выбирается меньшей на 1 узел и рассчитывается скорость  $V_{2y}$  и критерий оптимальности  $Q$ . Так продолжается до тех пор, пока  $V_{1y} = V_{1min}$ . Из полученного множества маневров расхождения  $(V_{1y}, V_{2y})$  в качестве оптимального выбирается тот, у которого  $Q = \min$ .

Для расчета скоростей оптимального маневра расхождения судов торможением была разработана компьютерная программа. В качестве примера была рассмотрена ситуация опасного сближения судов с параметрами: пеленг  $\alpha = 154^\circ$ , дистанция  $D = 4$  мили, параметры движения судов  $K_1 = 237^\circ$ ,  $K_2 = 278^\circ$ ,  $V_1 = 15$  узлов и  $V_2 = 20$  узлов,  $D_d = 1$  мили.

С помощью компьютерной программы, используя приведенную ситуацию опасного сближения для активного торможения обоих судов были рассчитаны оптимальные скорости  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$ . При расчете допускалось, что оба судна имеют одинаковые инерционно-тормозные характеристики. Расчет проводился по разработанному алгоритму с использованием формул (1) и (2).

В результате расчета были определены скорости расхождения  $V_{1y} = 14,7$  уз и  $V_{2y} = 14,4$  уз.

Было произведено имитационное моделирование процесса расхождения судов при снижении их скоростей на постоянных курсах. На рис. 2 показано начало процесса расхождения. Завершение торможения первого судна на 5 секунде отображено на рис. 3, а завершение торможения второго судна показано на рис. 4. На рис. 5 показана ситуация кратчайшего сближения.

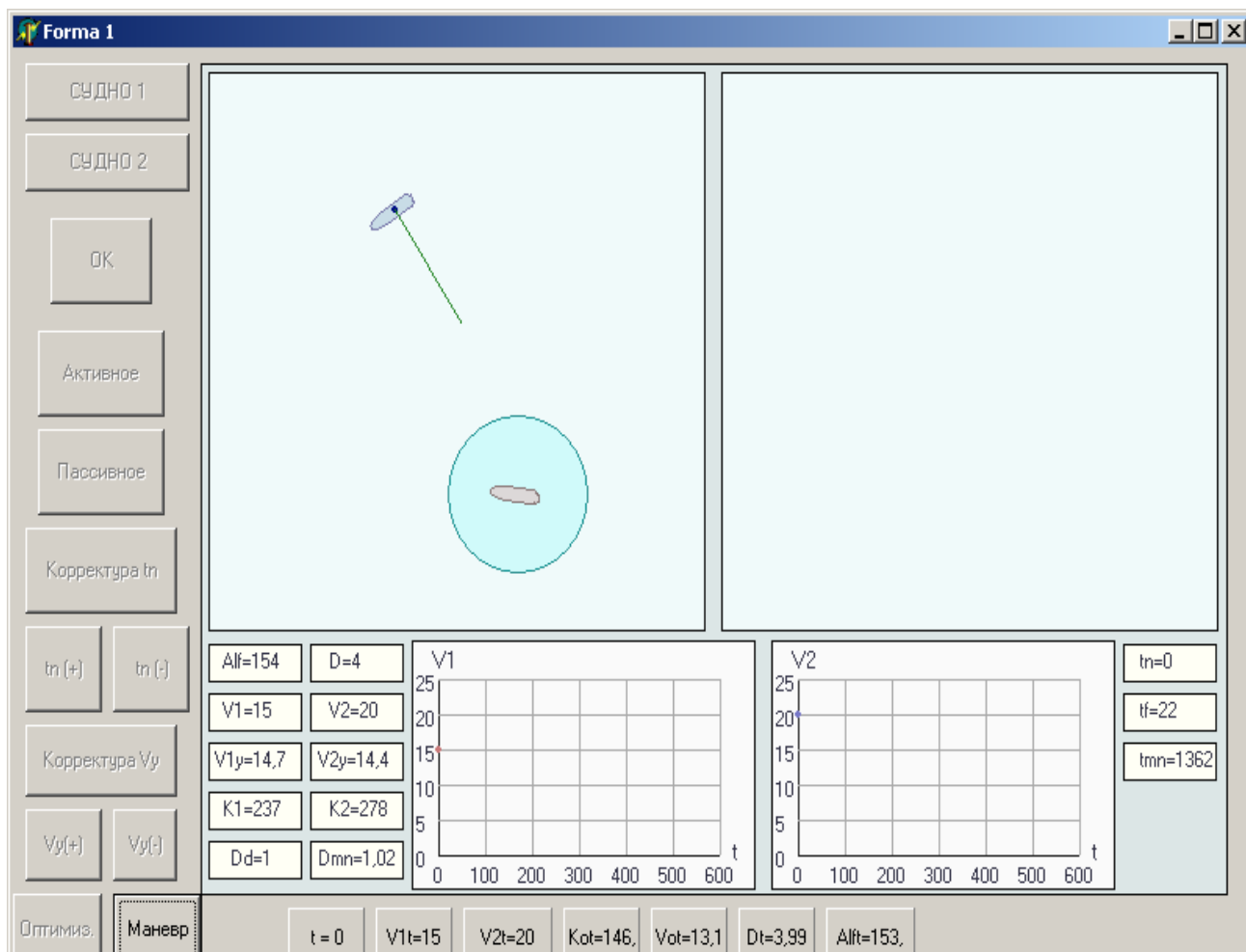


Рис. 2. Начало процесса расхождения

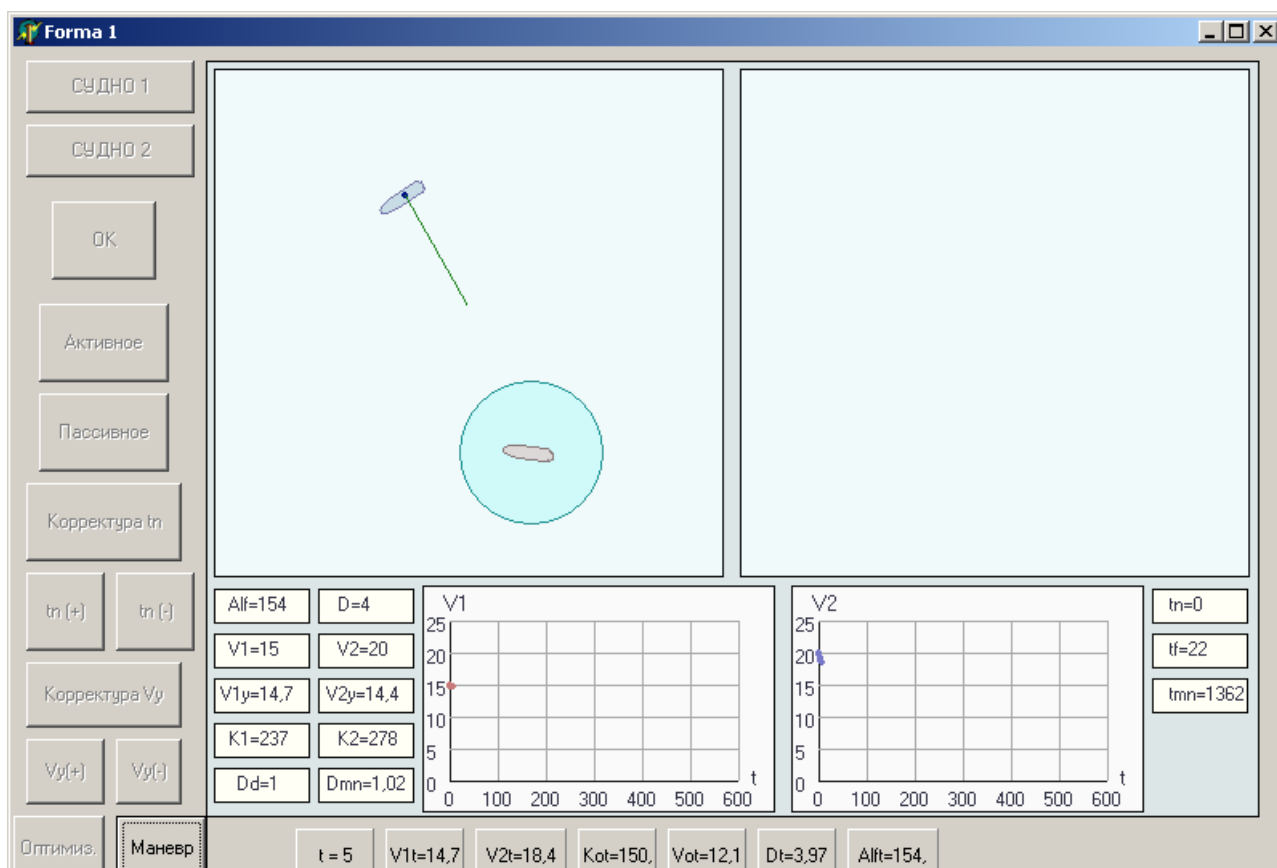


Рис. 3. Завершение торможения первого судна

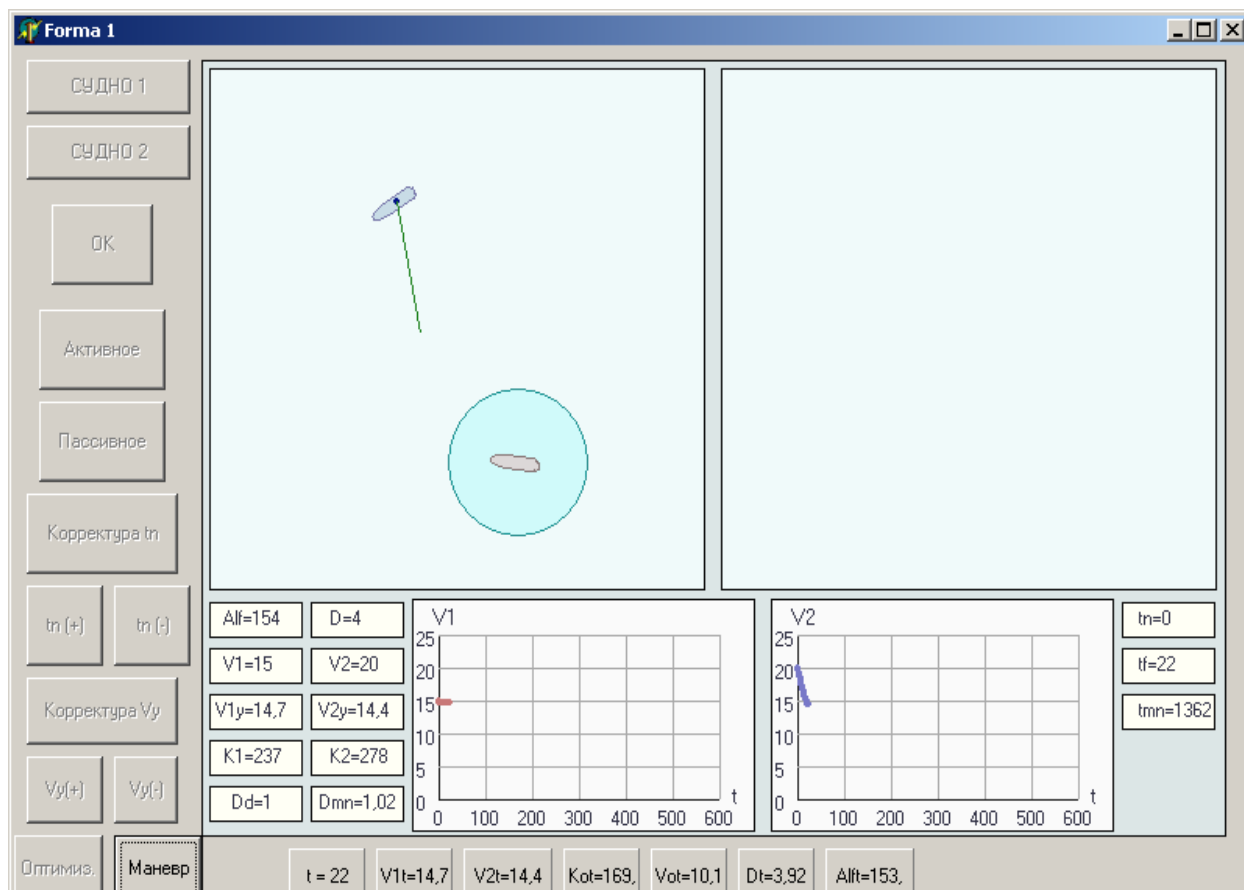


Рис. 4. Завершение торможения второго судна

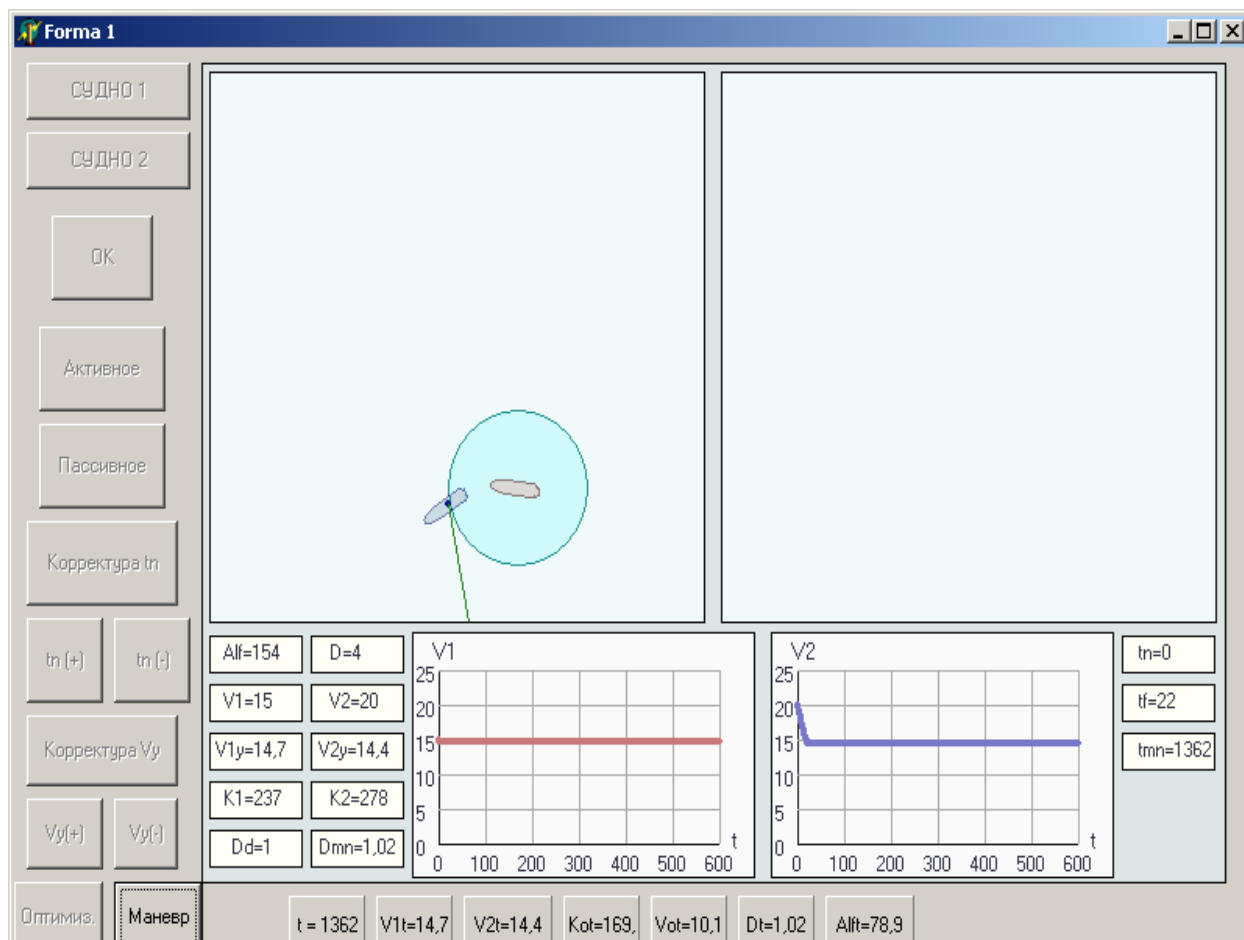


Рис. 5. Ситуация кратчайшего сближения

### Выводы

1. Рассмотрен метод автоматического выбора оптимальной стратегии расхождения судов при снижении их скоростей на постоянных курсах.
2. Приведен пример опасной ситуации сближения

судов и выбор оптимальной стратегии расхождения снижением их скоростей активным торможением.

3. Произведено имитационное моделирование маневра расхождения, подтверждающее корректность предложенного метода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
3. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / И.В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
4. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Грин Д.С., 2015. - 312 с.
5. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
6. 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.
7. 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.
8. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №6. – С. 103 - 107.
9. 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.

### REFERENCES

1. Pavlov V.V. Some questions of choice of maneuver in the situations of divergence of vessels/ Pavlov V.V., Senshin N.I. // Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika. - 1985.- №68. - p. 43 - 45.
2. Kulikov A.M. Optimum management by divergence of vessels / Kulikov A.M., and Poddubnyy V.V.// Sudostroenie. - 1984.- №12.- p. 22 - 24.
3. Safin I.V. Choice of optimum maneuver of divergence / I.V. Safin // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. - 2002.- №7. - p. 115 -120.
4. Pyatakov E. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision/Pyatakov E., Buzhbetskiy R., Burmaka I., Bulgakov A., Kherson: Grin D.S., 2015.-312 p.
5. Burmaka Y.A. Results of imitation design of process of divergence of vessels taking into account their dynamics / Burmaka Y.A.// Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. - 2005.- №10. - P. 21 – 25.
7. Burmaka I. Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels / Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 p.
8. Petrichenko E.A. Conclusion of condition of existence of great number of possible manoeuvres of divergence taking into account navigation dangers/ Petrichenko E.A. // Sudovozhdenie.- 2003.- №6. - p. 103 – 107.
9. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.- LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbryukken (Germany), – 2016. - 585 p.

### Automatic determination of parameters of optimum strategy of divergence of vessels at the diminishment of their speeds on permanent courses

#### D. Fedorov, I. Burmaka

The method of automatic choice of optimum strategy of divergence of vessels at the diminishment of their speeds on permanent courses is considered. The example of dangerous situation of rapprochement of vessels and choice of optimum strategy of their divergence by the diminishment of speeds by the active braking is resulted. The imitation design of maneuver of divergence is produced, confirmative correctness of the offered method.

**Keywords:** safety of navigator, divergence of vessels at dangerous rapprochement, maneuver of divergence by the active braking, imitation design.