

## Імітаційне моделювання визначення оптимальної стратегії розходження суден в ситуації їх небезпечного зближення

І. О. Бурмака, О. В. Янчецький, Д. Б. Федоров, Є. А. Петріченко

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна  
Corresponding author. E-mail: burmaka1964@gmail.com

Paper received 28.04.21; Accepted for publication 19.05.21.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2021-255IX32-08>

**Анотація.** В роботі приведено алгоритм пошуку оптимальної стратегії розходження способом сканування в ситуації небезпечного зближення чотирьох суден. В заданій ситуації зближення розраховано значення оптимальних курсів ухилення трьох суден, що небезпечно зближуються, та підтверджено безпеку їх розходження. Імітаційним моделюванням процесу розходження підтверджено коректність визначення оптимальної стратегії розходження способом сканування.

**Ключові слова:** безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, розходження групи суден, імітаційне моделювання.

**Вступ.** Зростання швидкостей та підвищення інтенсивності руху на водних шляхах, збільшення розмірів транспортних суден, плавання в складних навігаційних умовах роблять проблему забезпечення безаварійності судноплавства однією із найбільш пріоритетних і актуальних. Забезпечення безаварійності судноводіння веде до покращання охорони людського життя на морі та зниження шкоди навколишньому середовищу і майну.

Попередження зіткнень суден при плаванні в стислих районах є однією із найбільш актуальних проблем забезпечення безаварійності судноводіння, вирішення якої потребує вдосконалення методів оцінки безпечності ситуації зближення та, в разі необхідності, способів оперативного вибору маневру розходження.

**Короткий огляд публікацій по темі.** В роботі [1] досліджено принципи локально-незалежного і зовнішнього управління процесом розходження суден, що небезпечно зближуються, а також приведено детальний аналіз методів їх реалізації.

У монографії [2] розглянуто метод розходження суден в морі шляхом зміщення на паралельну лінію шляху, причому для розходження застосовується одна стратегія - зміщення на лінію паралельну шляху під тим або іншим кутом до лінії вихідного курсу. Підвищення ефективності попередження зіткнень суден, як зазначається в ній, може бути досягнуто створенням нових алгоритмів та інтелектуальних систем.

В роботі [3] розглянуто принцип зовнішнього управління процесом розходження суден і його основні переваги. Показано, що основними методами зовнішнього управління процесом розходження суден є області небезпечних курсів суден, що зближуються, і їх небезпечних швидкостей, за допомогою яких можливі оцінка безпеки ситуації зближення і вибір маневру розходження. При виборі безпечних курсів розходження суден за допомогою області небезпечних курсів запропонована процедура урахування точкової навігаційної перешкоди.

В роботі [4] для ситуації зближення судна з двома цілями запропоновано спосіб формування областей неприпустимих значень параметрів руху судна щодо кожної з них. Одержано процедуру оцінки безпеки ви-

никлої ситуації зближення по кожній цілі застосуванням сформованих областей.

Показано можливість вибору маневру розходження загальним ухиленням від двох цілей за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху судна. Як приклад розглянуті три ситуації зближення судна з двома цілями.

Аналітичні вирази меж областей небезпечних курсів і небезпечних швидкостей, за допомогою яких здійснюється формування даних областей при зовнішньому управлінні процесом розходження суден приведено в роботі [5]. Розглянуто процедури оцінки безпеки зближення суден і маневру їх розходження за допомогою області небезпечних курсів і області їх небезпечних швидкостей.

Одержано формули меж області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна і запропонована процедура її графічного відображення.

В роботах [6,7] запропоновано процедури визначення маневрів розходження для автономних суден. На сучасному етапі основні розробки по даній проблемі присвячені методам для систем попередження зіткнень автономних суден і розподільним алгоритмам для ситуацій зближення декількох суден, в яких вони можуть обмінюватися намірами, використовуючи систему AIS.

Принцип дії автономної суднової системи ухилення від зіткнення CA (Collision avoidance) та його теоретичне обґрунтування розглянуто в роботі [8], в якій приведено алгоритм ухилення від зіткнення та проаналізовані Правила ухилення від зіткнення COLREG. Вказується, що дослідження щодо автоматизації управління судном можуть носити класичний підхід, заснований на застосуванні математичних моделей та алгоритмів, або комп'ютерний характер, який базується на використанні штучного інтелекту, і згадані підходи можуть бути викладені у відповідних категоріях. Розподільні алгоритми для ситуацій зближення декількох суден розглянуто в роботі [9].

**Мета.** Метою даної публікації являється імітаційне моделювання автоматичного вибору оптимальної стратегії розходження декількох суден в ситуації їх небезпечного зближення.

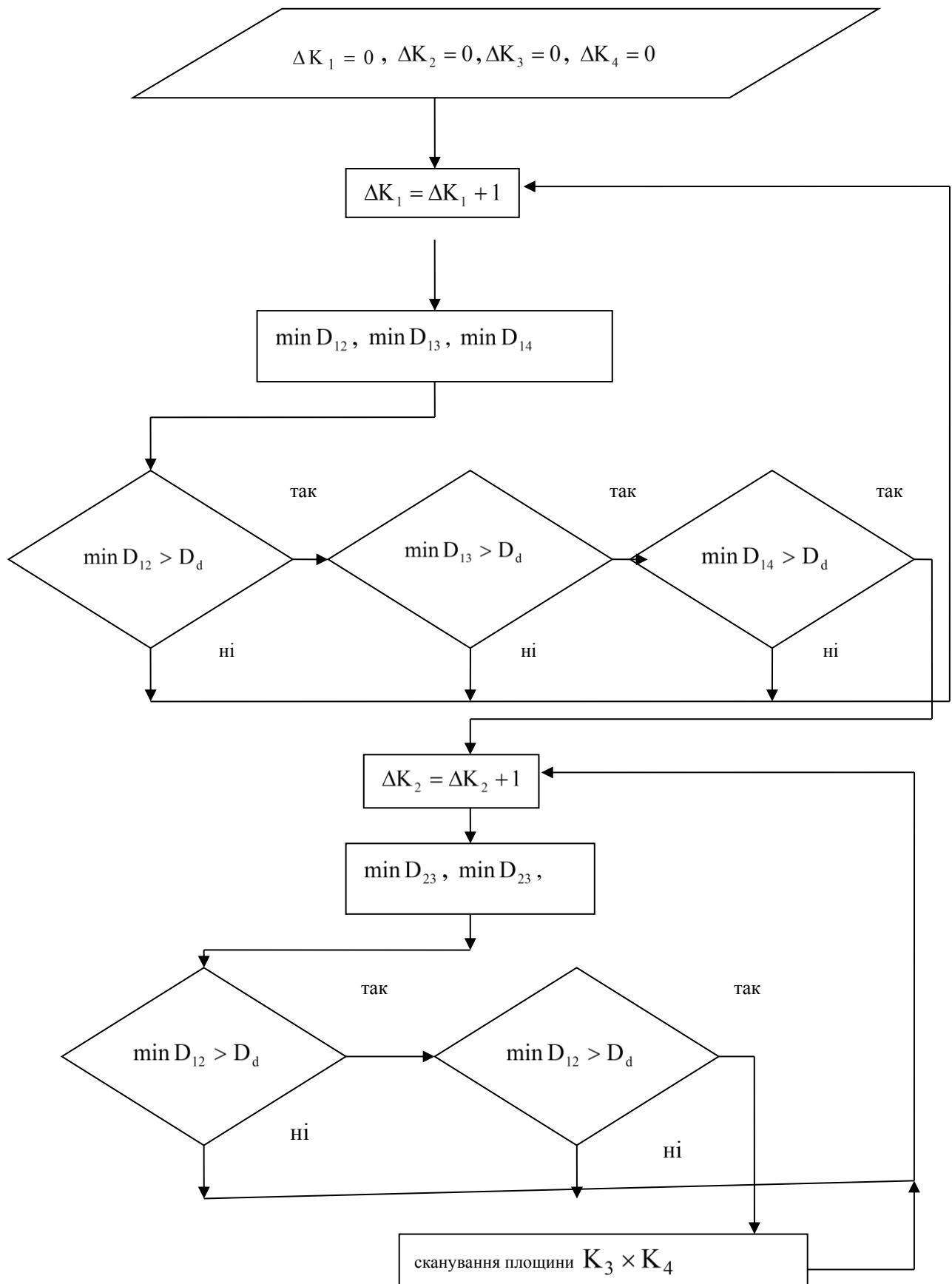


Рис. 1. Алгоритм пошуку оптимальної стратегії розходження

**Матеріали і методи.** В роботі [1] розглянуто умову вибору оптимальної стратегії розходження для ситуації небезпечного зближення чотирьох суден при необхідності зміни курсів кожного з них, що має вигляд:

$$Q_4^{(2)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min$$

$$\begin{aligned} \min D_{12}(\Delta K_1, \Delta K_2) &> D_d, \\ \min D_{13}(\Delta K_1, \Delta K_3) &> D_d, \\ \min D_{14}(\Delta K_1, \Delta K_4) &> D_d, \end{aligned}$$

$$\min D_{23}(\Delta K_2, \Delta K_3) > D_d,$$

$$\min D_{24}(\Delta K_2, \Delta K_4) > D_d,$$

$$\min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4) > D_d,$$

де  $\Delta K_i$  - приріст курсу і-го судна;

$\min D_{ij}(\Delta K_i, \Delta K_j)$  - дистанція найкоротшого збли-

ження між і-м та j-м суднами;

$D_d$  - гранично - допустима дистанція зближення.

Для пошуку оптимальної стратегії розходження за допомогою вище приведеної умови в роботі [1] був запропонований алгоритм пошуку оптимальної стратегії розходження способом сканування, який показано на рис.1.

Відзначимо, що аналогічно проводиться визначення оптимальної стратегії розходження способом сканування для ситуацій небезпечного зближення двох, трьох і п'яти суден.

**Результати і їх обговорення.** Для ситуації небезпечного зближення трьох суден за допомогою розглянутого алгоритму була розроблена імітаційна програма визначення оптимальної стратегії розходження. Програмою передбачене введення параметрів ситуації небезпечного зближення, розрахунок курсів ухилення суден для безпечної розходження і перевірка її коректності шляхом програвання одержаної стратегії.

Як приклад розглянемо наступну ситуацію небезпечного зближення трьох суден, яка показана на рис. 2 і характеризується наступними параметрами:

$K_1 = 87^\circ$ ,  $K_2 = 188^\circ$ ,  $K_3 = 347^\circ$ ,  $V_1 = 18$  вуз,  $V_2 = 24$  вуз,  $V_3 = 18$  вуз,  $\alpha_{12} = 45^\circ$ ,  $\alpha_{13} = 135^\circ$ ,  $\alpha_{23} = 180^\circ$ ,  $D_{12} = 3,5$  м,  $D_{13} = 3,5$  м,  $D_{23} = 5,0$  м. Гранична дистанція зближення вибрана рівною 1 милі.

Програмою були розраховані значення курсів ухилення всіх трьох суден, що небезпечно зближуються, які рівні наступним значенням:

$$K_{1y} = 56^\circ, K_{2y} = 169^\circ, K_{3y} = 347^\circ.$$

Звертаємо увагу, що для безпечної розходження досить зміни курсів першого і другого суден.

Перевірка коректності розрахованої стратегії розходження проводиться в два етапи: по-перше, за допомогою області неприпустимих значень курсів перевіряється безпека розходження кожної пари суден, що зближуються, і, по-друге, проводиться імітаційне моделювання процесу розходження групи суден.

Розглянемо перший етап перевірки коректності стратегії розходження трьох суден.

З рис. 3 видно, що для розрахованих курсів ухилення  $K_{1y} = 56^\circ$  і  $K_{2y} = 169^\circ$ , перше і друге судна безпечно розходяться, причому дистанція найкоротшого зближення складає 1,63 милі.

Як видно з рис. 4, перше і третє судна, при курсах ухилення  $K_{1y} = 56^\circ$  і  $K_{3y} = 347^\circ$ , безпечно розходяться, при цьому дистанція найкоротшого зближення рівна 1,39 милі.

З рис. 5 виходить, що при проходженні курсами ухилення  $K_{2y} = 169^\circ$  і  $K_{3y} = 347^\circ$ , друге і третє судна безпечно розходяться на дистанції найкоротшого зближення 1,02 милі.

Розглянемо другий етап перевірки коректності розрахованої стратегії розходження: імітаційне моделювання процесу розходження трьох суден розрахованими курсами ухилення  $K_{1y} = 56^\circ$ ,  $K_{2y} = 169^\circ$ ,  $K_{3y} = 347^\circ$ . Початок процесу розходження на третій секундці показаний на рис. 6.

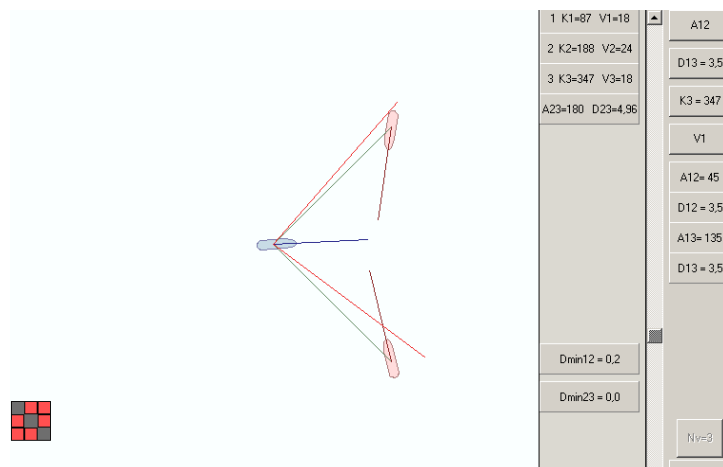


Рис. 2. Ситуація небезпечного зближення трьох суден

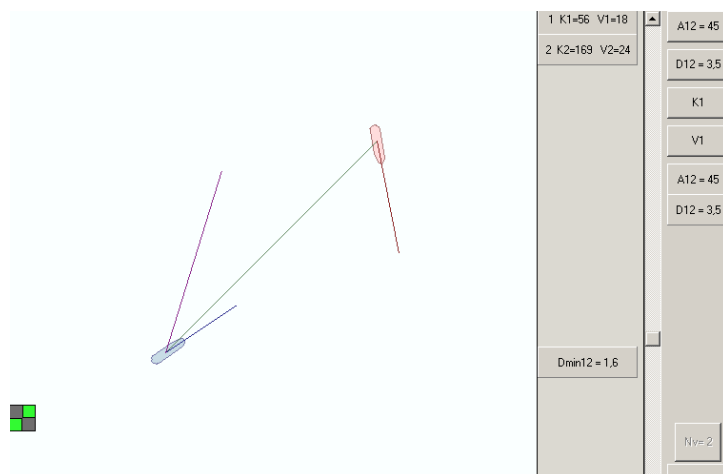


Рис. 3. Безпечне розходження першого і другого суден

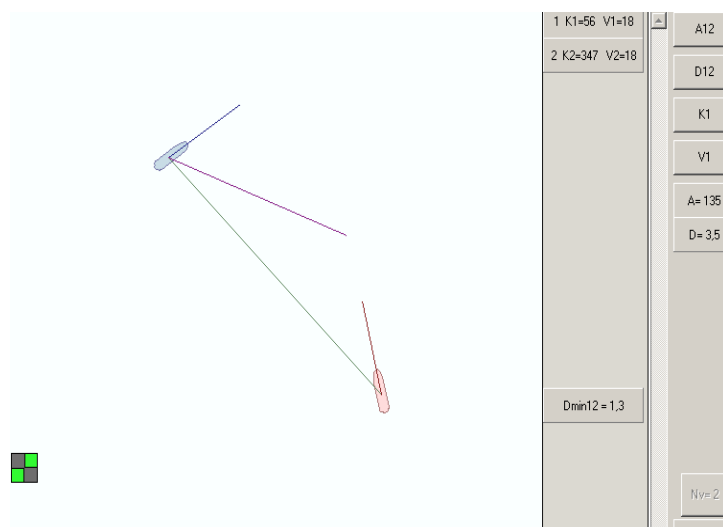


Рис. 4. Безпечне розходження першого і третього суден

Ситуація найкоротшого зближення першого і другого суден на дистанцію 1,64 милі відображена на рис.

7, яка має місце на 334 с процесу розходження.

На рис. 8 показана ситуація найкоротшого зближення другого і третього суден на дистанцію 1,01 милі практично рівної гранично - допустимій дистанції зближення. Дана ситуація настає на 414 с після початку процесу розходження.

На 562 с після початку процесу розходження відбувається найкоротше зближення першого і третього суден, дистанція якого рівна 1,39 милі. Дана ситуація показана на рис. 9.

**Висновки**

1. Приведено алгоритм пошуку оптимальної стратегії розходження способом сканування в ситуації небезпечного зближення чотирьох суден.

2. Розраховано значення оптимальних курсів ухилення трьох суден, що небезпечно зближуються, в заданій ситуації зближення та підтверджено безпеку їх розходження.

3. Представлено результати імітаційного моделювання процесу розходження, які підтвердили коректність визначення оптимальної стратегії розходження способом скануванням.

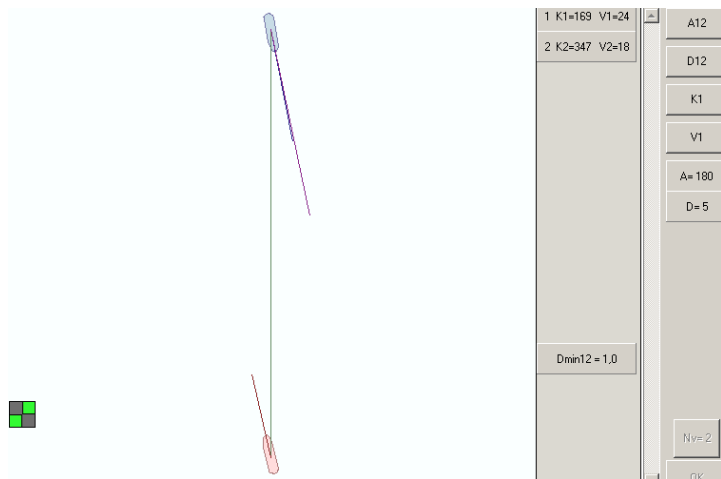


Рис. 5. Безпечне розходження другого і третього суден

D12=3,48  
 D13=3,49  
 D23=4,92

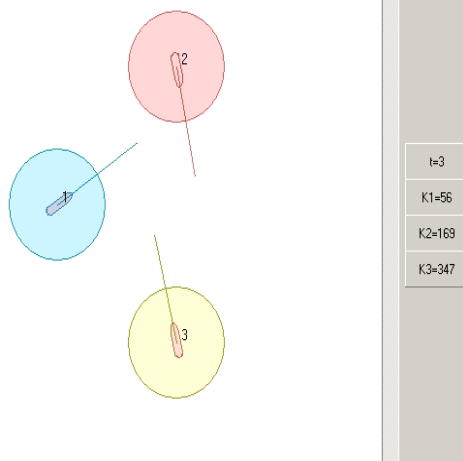


Рис. 6. Початок процесу розходження суден

D12=1,64  
 D13=1,92  
 D23=1,39

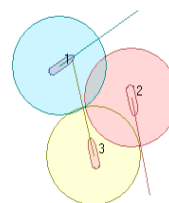


Рис. 7. Ситуація найкоротшого зближення першого і другого суден

D12=1,89  
 D13=1,64  
 D23=1,02

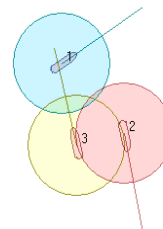


Рис. 8. Ситуація найкоротшого зближення другого і третього суден

D12=2,90  
 D13=1,39  
 D23=1,98

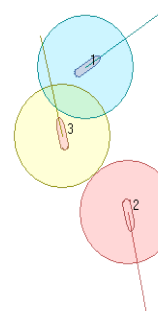


Рис. 9. Ситуація найкоротшого зближення першого і третього суден

#### ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: Фенікс, 2013. - 180 с.
3. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.
4. Пятаков Э.Н. Способ определения безопасного маневра расхождения судна изменением курса в ситуации опасного сближения с двумя целями/ Э.Н. Пятаков, В.Э. Пятаков, Т.Ю. Омелченко // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(18), Issue: 158, 2018.- С. 72 - 75.
5. Бурмака И.А. Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении. / И.А. Бурмака, С.С. Пасечнюк // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (18), Issue: 158, 2018. - С. 41- 46.
6. Woerner K.L. Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles / K.L.Woerner, M.R.Benjamin, M.Novitzky, J. J.Leonard // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE. - 2016. - P. 1-6.
7. Kuwata Y. Safe maritime autonomous navigation with colregs, using velocity obstacles / Y. Kuwata, M. T. Wolf, D. Zarzhitsky, T. L. Huntsberger // IEEE Journal of Oceanic Engineering. - 2014. - 39(1). - P. 110-119.
8. Statheros T. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / T. Statheros, G. Howells, K. M. Maier //Journal of Navigation. - 2008. - 61(1). - P.129-142.
9. Hirayama K. Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed / K.Hirayama, K.Miyake, T.Shiota, T.Okimoto //TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2019. - 13(1). - P. 23-29.

#### REFERENCES

1. 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.
2. Vagushchenko L.L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / Vagushchenko L.L.- Odessa: Feniks.- 2013.- 180 p.
3. Burmaka I.A. Warning of collisions of vessels by the methods of external control of process of divergence./ Burmaka I.A., Kalynyuchenko G.E, Kulakov M.A. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.
4. Pyatakov E.N. Method of determination of safe maneuver of divergence of ship by the change of course in the situation of dangerous rapprochement with two targets./ Pyatakov E.N., Pyatakov V.E., Omelchenko T.Yu. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(18), Issue: 158, 2018.- С. 72 - 75.
5. Burmaka I.A. Choice of joint strategy of divergence of vessels by the change of parameters of motion at their external management./ I.A. Burmaka, S.S. Pasechnyuk. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (18), Issue: 158, 2018. - С. 41- 46.

#### **Imitation design of determination of optimum strategy of divergence of ships in the situation of their dangerous rapprochement** **I. Burmaka, O. Yanchetsky, D. Fedorov, E. Petrichenko**

**Abstract.** In work the algorithm of search of optimum strategy of divergence by the method of scanning is resulted in the situation of dangerous rapprochement of four ships. The value of optimum courses of deviation of three ships which are dangerously drawn together is expected in the inflicted situation of rapprochement, and safety of their divergence is confirmed. By the imitation design of process of divergence shown correctness of determination of optimum strategy of divergence by the method of scanning.

**Keywords:** safety of navigation, warning of collisions of ships, divergence of group of ships, imitation design.