

## Временско-просторна анализа пловидбене незгоде на унутрашњим пловним путевима

АЛЕКСАНДАР Н. РАДОЊИЋ, Универзитет у Београду,

Саобраћајни факултет, Београд

ВЛАДИСЛАВ С. МАРАШ, Универзитет у Београду,

Саобраћајни факултет, Београд

ДАНИЈЕЛА Б. ПЈЕВЧЕВИЋ, Универзитет у Београду,

Саобраћајни факултет, Београд

Оригинални научни рад

UDC: 656.6.084

DOI: 10.5937/tehnika1704565R

У раду је представљен нови метод за повећање сигурности пловидбе на реци на основу примера конфликтне ситуације два пловила. Наведени су неки од параметара кретања пловила у зависности од маневра пловила као што су: време за које два пловила прелазе различите раздаљине, подручје у коме постоји опасност од судара (конфликтно подручје), полупречник конфликтног подручја и брзине пловидбе два пловила. Извршено је предвиђање будућих позиција, брзина кретања и курсева два пловила на основу којих су донети закључци о сигурности пловидбе на реци.

За проверу модела и прорачун коначних резултата коришћени су самоходни моторни теретњак и метални чамац са ванбродским мотором као чести актери пловидбених незгода.

Извршена је анализа могућности појаве пловидбене незгоде при пресецању курсева пловидбе на реци у циљу одређивања момента благовременог предузимања маневара заповедника самоходног моторног теретњака и руковоаца металног чамаца ради избегавања судара.

**Кључне речи:** унутрашњи пловни пут, пловидбена незгода, конфликтно подручје, самоходни моторни теретњак, метални чамац

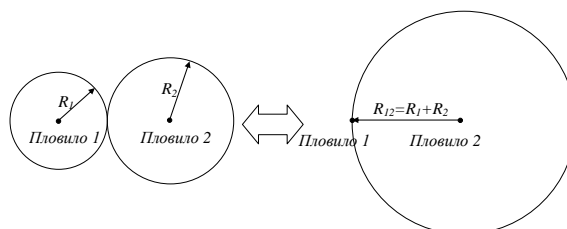
### 1. УВОД

Доступна литература [12] дефинише транспортне отказе као догађаје везане за брод, пловна средства или друге објекте којима се нарушава транспортни процес и проузрокују штете људима, терету, броду и другим објектима.

Транспортни откази деле се на: пловидбене незгоде, пловидбене отказе и недостатке у току рада. Често се пловидбене незгоде и пловидбени откази обједињују јединственим појмом “случајеви пловидбених незгода”.

Пловидбене незгоде се најчешће дешавају између два пловила, али није искључено да се могу појавити и између више пловила или на само једном пловилу током пловидбе.

Пловидбеним незгодама претходе кретања пловила по одређеним курсевима. Уколико дође до пресецања линија курсева пловила постоји вероватноћа да ће се пловила сударити у одређеним временским тренуцима. Да се то не би догодило заповедници управљају пловилима на начине којима избегавају сударе.



Слика 1 - Конфликтно подручје

Ипак, да би се лакше објаснила ситуација која претходи судару пловила морају се утврдити одређени параметри кретања пловила који доводе до судара. Један од параметара кретања представља конфликтно подручје. То је подручје у коме постоји вероватноћа судара два пловила ако им се линије курсева пресецају. Подручје је кружно

Адреса аутора: Александар Радоњић, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, Београд, Војводе Степе 305

e-mail: a.radonjic@sf.bg.ac.rs

Рад примљен: 22.05.2017.

Рад прихваћен: 04.07.2017.

облика, а пречник се добија као растојање између два пловила (видети слику 1) [1].

Да се не би свака удаљеност проглашавала за конфликтно подручје, морају се одредити полу-пречници  $R_1$  и  $R_2$  (видети слику 1). Полу-пречници  $R_1$  и  $R_2$  одређују се на основу кружних подручја око пловила, унутар којих, према мишљењу управитеља или заповедника, не смеју да се нађу други пловни објекти. [6] и [7].

Полупречник конфликтног подручја назива се још и најмања дозвољена раздаљина ( $R_{12}$ ) између два пловила при којој не долази до судара и мери се између тежишта система два пловила. Полу-пречник конфликтног подручја једнак је [10]:

$$R_{12} = 3 \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (m) \quad (1)$$

где су:

$L_1$  – дужина једног пловила (m);

$L_2$  – дужина другог пловила (m).

Са слике 1 јасно је да се конфликтно подручје успоставља, мења и нестаје са кретањем пловила и у одређеним тренуцима времена. Са слике 1 види се да до судара пловила може доћи ако се њихове линије курсева секу и ако пловила не мењају свој смер кретања.

Следећи важан чинилац који одређује вероватноћу судара је брзина кретања два пловила. Ако се пловила не крећу истим брзинама мања је вероватноћа да ће доћи до судара.

Важан чинилац који утиче на вероватноћу судара су предузети маневри управитеља или заповедника пловила. Уколико управитељи или заповедници пловила реагују у правом тренутку или одређеном опсегу времена вероватноћа настанка судара се смањује.

На крају, најважнији чинилац који утиче на вероватноћу настанка судара је минимално растојање до судара. То је растојање при којем два заповедника пловила могу да избегну судар ако примене одговарајуће маневре за избегавање судара [9]. Настајањем конфликтног подручја, пловила смањују међусобно растојање чиме у одређеном тренутку могу да достигну минимално растојање до судара.

Уколико се растојање између пловила умањи на вредност која је мања од минималног растојања претпоставка је да ће до судара два пловила доћи без обзира на предузете маневре. Циљ овог рада је доказ наведене претпоставке. Доказ је урађен на рачунском примеру кретања самоходног моторног теретњака и чамца са ванбродским мотором.

Кретање поменутих пловила је анализирано у конфликтном подручју.

Вероватноћа појаве конфликтних подручја на рекама је велика јер, услед кретања пловила по унапред задатим путањама и пловним путевима, често долази до мимоилажења при растојањима која су довољно мала и узрокују настанак конфликтног подручја.

На реци су посебно ризична сусретања између теретних бродова и малих металних чамца. Метални чамци представљају пловне објекте који се не користе у чисто комерцијалне сврхе, а нису ни обавезни да се крећу унапред дефинисаним пловним путевима. Због тога метални чамци често пресецају курсеве теретним бродовима и са њима стварају конфликтна подручја.

Најчешћи узроци који доводе до појаве конфликтних подручја код сусретања самоходних моторних теретњака и металних чамца су непажња заповедника бродова и управитеља чамца, као и услови лоше видљивости на пловном путу.

У овом раду извршена је временско-просторна анализа конфликтног подручја између самоходног моторног теретњака и металног чамца. Претпостављени угао пресецања линија курсева ова два пловила, за који је одређено минимално растојање до судара, износио је од  $90^\circ$  до  $130^\circ$ . Анализа је рађена за пловидбу у мирној води.

Резултати прорачуна потврдили су наведену претпоставку, односно доказано је да приликом приближавања два пловила обавезно настаје конфликтно подручје у коме се може догодити пловидбена незгода, као и временски тренутак и опсег времена који када се појаве није могуће реаговати да би се избегла пловидбена незгода.

## 2. РЕЛЕВАНТНА ЛИТЕРАТУРА

Последњих година објављено је доста радова који се баве пловидбеним незгодама и одређивањем минималног растојања до судара.

Први рад у овом поглављу који треба да се нагласи је рад Фуџија [5]. И поред своје једноставности и лаке примене, у раду нису узети у разматрање маневри који доводе до избегавања судара. На тај начин процењено је да ће се два брода сударити уколико се налазе на линијама курсева који се пресецају.

Следећи рад који се бави конфликтним подручјем и минималним растојањем до судара између два брода је рад Педерсена [11]. У његовом раду разматрани су само курсеве бродова код којих

се бродови сучељавају прамцима. Минимално растојање до судара сматрано је за константну вредност. У раду Мекдафа [8] тврди се да је број конфликтних ситуација између бродова у вези са вероватноћом судара између бродова.

Током година развила се и посебна област сигурности пловидбе у којој се разматра фреквенција судара бродова. Радови који се баве овом темом су радови Тана и Отаја [15], Фаулера [4], Слапчинског [13] и Ванга [17].

Следећа група радова повезана је са компјутерском симулацијом пловидбених незгода. У овим радовима обрађују се различити сценарији пловидбе који доводе до судара бродова. Од ових радова најважнији су радови Данда [3], Жанга [18] и Тиана [16].

Последњи рад у овом поглављу који треба нагласити је рад Радоњића и Мараша [13]. Аутори су направили модел за избегавање судара код бродова који се крећу праволинијски. Узели су у обзир маневар заустављања бродова код одређивања минималног растојања до судара бродова. Модел је тестиран на бродовима који плове реком Дунав.

Идеју да се маневарске особине бродова и једначине кретања бродова уврсте у прорачун минималног растојања до судара први је увео Куртис [2]

По мишљењу аутора, постоји веома мало радова који се баве сигурношћу пловидбе на рекама. Аутори сматрају да примена нове предложене методе у циљу повећања сигурности пловидбе, тј. смањења пловидбених незгода представља значајан допринос у области водног саобраћаја. Такође, аутори сматрају да се увођењем појмова као што су конфликтно подручје и минимално растојање до судара унапређује регулисање области сигурности пловидбе.

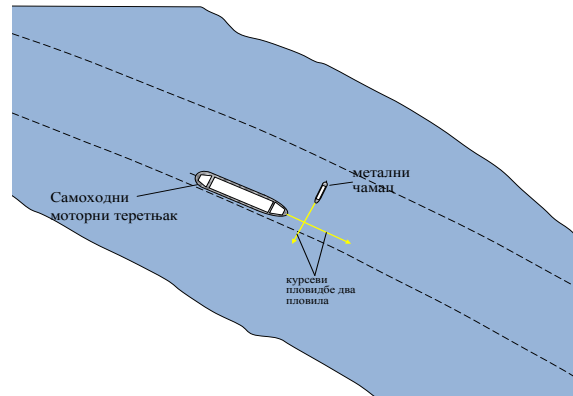
## 2. ВРЕМЕНСКО-ПРОСТОРНА АНАЛИЗА НАСТАНКА ПЛОВИДБЕНЕ НЕЗГОДЕ

Процена ризика од судара између самоходног моторног теретњака и металног чамца урадиће се на основу конфликтног подручја у које су упловили наведена пловила.

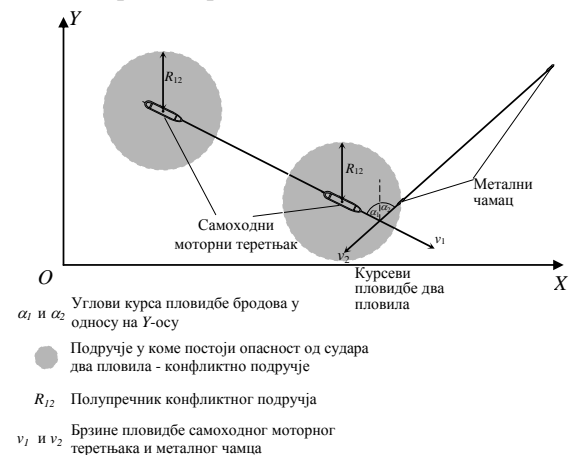
Сматраће се да се индекс „1“ у изразу (1) односи на самоходни моторни теретњак, док се индекс „2“, у истом изразу, односи на метални чамца. У овом раду усвојене су следеће дужине пловила за које се утврђује временско-просторна анализа настанка пловидбене незгоде:  $L_1 = 74,8$  m и  $L_2 = 5,58$  m.

На слици 2 представљен је положај самоходног моторног теретњака и металног чамца непосредно пре настанка пловидбене незгоде.

Са слике 2 види се да се курс пловидбе металног чамца пресеца са курсом пловидбе самоходног моторног теретњака. С обзиром на пресецање курсева два пловила закључује се да ће до њиховог судара доћи у одређеном тренутку. Због тога је на слици 3 представљено могуће конфликтно подручје настало на основу дужина поменута два пловила у  $OXY$  просторном координатном систему. Раван  $XY$  представља површину воде,  $X$ -оса је у правцу исток-запад, а  $Y$ -оса је у правцу север-југ.



Слика 2 - Графички приказ приближавања самоходног моторног теретњака и чамца непосредно пре настанка пловидбене незгоде



Слика 3 - Кретање разматраних пловила у конфликтном подручју у  $OXY$  координатном систему

Уколико се у изразу (1) замене вредности за  $L_1$  и  $L_2$ , вредност полупречника конфликтног подручја ( $R_{12}$ ) једнака је 120,57 m.

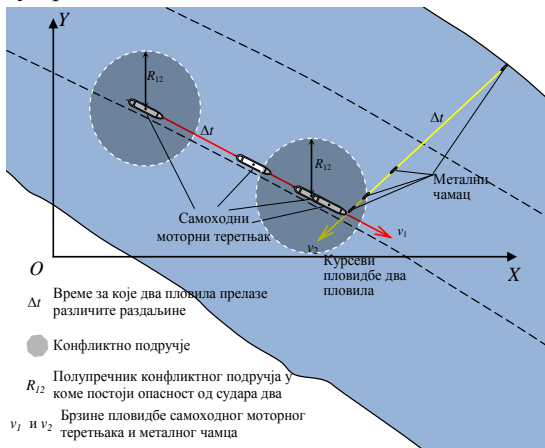
На слици 4 представљени су различити положаји два поменута пловила који претходе судару. Важност слике огледа се у могућности да се види целокупан след догађаја пре настанка пловидбене незгоде.

На самом почетку, два пловила се налазе далеко једно од другог. Пловила се приближавају једно другом формирајући конфликтно подручје.

Уласком у конфликтно подручје судар још увек може да се спречи. Међутим, уколико се не поштују правила пловидбе до судара долази како је то представљено на слици 4.

У случају да, у одређеним тренуцима, чланови посада пловила међусобно уоче друго пловило по упловљавању у конфликтно подручје судар се може избећи правовременим маневрима заповедника пловила. Међутим, после одређеног времена до судара два пловила ће доћи иако су чланови посада уочили пловила и без обзира на примењене маневре.

С обзиром да се у раду не спомињу брзине кретања два пловила, тј. да су оне предмет анализе, тачке у конфликтном подручју у којима се јавља последњи тренутак када може да се избегне судар нису приказане на слици 4.



Слика 4 - Приказ конфликтног подручја, полупречника конфликтног подручја и два пловила у  $OXY$  координатном систему

За временско-просторну анализу судара два пловила најважнији су: полупречник конфликтног подручја и време пловидбе од уласка пловила у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде ( $\Delta T$ ). Време  $\Delta T$  прорачунаће се у наредном потпоглављу.

### 3.1. Прорачун времена пловидбе од уласка пловила у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде ( $\Delta T$ )

Претпоставља се да заповедник самоходног моторног теретњака не користи потребне навигационе уређаје из било ког разлога и да због тога не види метални чамца унутар конфликтног подручја. Такође, претпоставља се да су временски услови такви да управитељ металног чамца не види разматрани самоходни моторни теретњак са слике 4, у временском опсегу који му је довољан да реакцијом избегне судар.

Претпоставка је да су брзине пловидбе оба пловила биле константне од почетних тренутака са

слике 4 до тренутка настанка пловидбене незгоде. Време од уласка пловила у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде ( $\Delta T$ ) прорачунава се на основу следећег израза [1]:

$$\Delta T = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2}}{2a_0} \quad (s) \quad (2)$$

где су:

$$a_0 = (x_2(t_0) - x_1(t_0))^2 + (y_2(t_0) - y_1(t_0))^2 - R_{12}^2;$$

$$a_1 = -2(x_2(t_0) - x_1(t_0))(v_1 \sin \alpha_1 + v_2 \sin \alpha_2) - 2(y_2(t_0) - y_1(t_0))(v_2 \cos \alpha_2 - v_1 \cos \alpha_1);$$

$$a_2 = v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2 (\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 - \cos \alpha_1 \cos \alpha_2);$$

$(x_{1,2}(t_0), y_{1,2}(t_0))$  – позиције пловила у почетном тренутку;

$t_0$  – почетни тренутак;

$v_1$  – брзина пловидбе самоходног моторног теретњака (km/h);

$v_2$  – брзина пловидбе металног чамца (km/h);

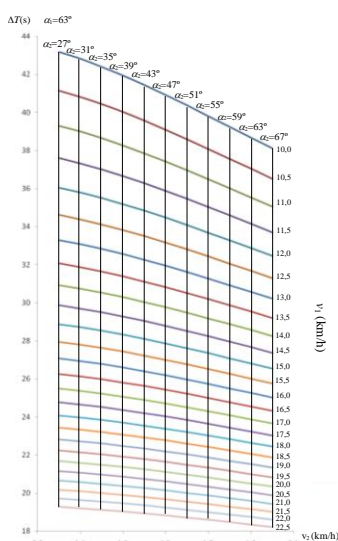
$\alpha_{1,2}$  – углови курса пловидбе у односу на  $Y$ -осу.

Пређени пут самоходног моторног теретњака је представљен правом линијом под углом од  $63^\circ$  (курс  $\alpha_1$ ) у односу на  $Y$ -осу. Са друге стране, тачно место наилаaska металног чамца на левој обали реке се не зна, те се угао курса пловидбе ( $\alpha_2$ ) мењао од  $27^\circ$  до  $67^\circ$  у односу на  $Y$ -осу. Разлика у курсевима два пловила била је од  $90^\circ$  до  $130^\circ$  ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 63^\circ + 27^\circ = 90^\circ$  и  $\alpha_1 + \alpha_2 = 63^\circ + 67^\circ = 130^\circ$ ). Ова разлика значи да су време и удаљеност између пловила од тренутка уласка у конфликтно подручје до судара били мали и да је маневар којим би се избегао судар морао да буде изведен у року од неколико секунди.

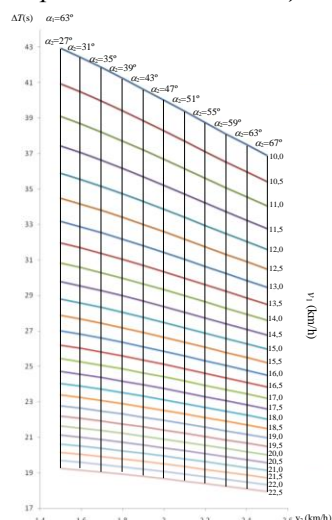
Да би се јасније стекао увид о променама времена  $\Delta T$ , потребно је урадити прорачун овог времена на основу израза (2) за претпостављену брзину пловидбе самоходног моторног теретњака ( $v_1$ ) у интервалу од 10 до 22,5 km/h. При разматрању брзине металног чамца ( $v_2$ ) потребне за прорачун времена  $\Delta T$  посматрана су два опсега брзина: од 1 до 2 km/h и од 1,5 до 2,5 km/h. На овај начин, време  $\Delta T$  може да се посматра за брзине пловидбе оба пловила које су у границама могућих за случај овакве пловидбене незгоде. На сликама 5 и 6 приказано је време пловидбе од уласка пловила у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде ( $\Delta T$ ) прорачунато на основу израза (2) и претходних претпоставки.

Прорачуната времена пловидбе, од уласка пловила у конфликтно подручје до момента настанка

пловидбене незгоде ( $\Delta T$ ), налазе се у границама од 18,2 s до 43,19 s (слика 5) и у границама од 17,95 s до 42,92 s (слика 6). На основу прорачунатих времена ( $\Delta T$ ), долази се до закључка да пређени пут металног чамца од тренутка када је ушао у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде износи од 10,1 m до 12 m за брзину пловидбе ( $v_2$ ) од 2 до 1 km/h и угао курса пловидбе металног чамца у односу на  $Y$ -осу ( $\alpha_2$ ) од  $67^\circ$  до  $27^\circ$  и од 12,46 m до 17,88 m за брзину пловидбе ( $v_2$ ) од 2,5 до 1,5 km/h и угао курса пловидбе металног чамца у односу на  $Y$ -осу ( $\alpha_2$ ) од  $67^\circ$  до  $27^\circ$



Слика 5 - Дијаграм времена пловидбе од уласка пловила у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде ( $\Delta T$ ) за опсег брзина металног чамца од 1 до 2 km/h



Слика 6 - Дијаграм времена пловидбе од уласка пловила у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде ( $\Delta T$ ) за опсег брзина металног чамца од 1,5 до 2,5 km/h

На основу прорачунатих времена ( $\Delta T$ ), пређени пут самоходног моторног теретњака од тренутка када је ушао у конфликтно подручје до момента настанка пловидбене незгоде износио је од 113,75 m до 119,97 m за брзину пловидбе ( $v_2$ ) од 1 до 2 km/h и угао курса пловидбе металног чамца у односу на  $Y$ -осу ( $\alpha_2$ ) од  $67^\circ$  до  $27^\circ$  и од 112,19 m до 119,22 m за брзину пловидбе ( $v_2$ ) од 1,5 до 2,5 km/h и угао курса пловидбе металног чамца у односу на  $Y$ -осу ( $\alpha_2$ ) од  $67^\circ$  до  $27^\circ$ .

Раздаљина између два пловила, у тренутку када је чамац ушао у конфликтно подручје, износила је 120,57 m.

#### 4. ЗАКЉУЧАК

На основу прорачунатих резултата закључује се да приликом пловидбе два пловила обавезно постоји конфликтно подручје у коме се може догодити пловидбена незгода, као и временски тренутак и опсег времена који када се појаве није могуће реаговати да би се избегла пловидбена незгода.

Модел прорачуна може се користити за било која два пловила која плове на реци, а не само за самоходни моторни теретњак и метални чамац са ванбродским мотором.

Предложена метода прорачуна предвиђања кретања пловила може се применити на било која два друга пловила и увести као део обуке заповедника бродова.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chai T, Wengc J, Xiong D. Development of a quantitative risk assessment model for ship collisions in fairways, *SafetyScience*, Vol. 91, pp. 71-83, 2017.
- [2] Curtis R. A ship collision model for overtaking, *Journal of Navigation*, Vol. 37 No. 04 pp. 397-406, 1986.
- [3] Dand, I.W. Approach channel design: the PIANC approach. *In Proceedings of the International Workshop on Channel Design and Vessel Maneuverability*, pp. 45-49, 2001.
- [4] Fowler T.G, Sorgard E. Modeling ship transportation risk, *Risk Analysis*, Vol. 20 pp. 225-244, 2000.
- [5] Fujii Y, Yamanouchi H, Mizuki N. Some factors affecting the frequency of accidents in marine traffic—the probability of stranding and the effect of darkness on the probability of collision and stranding, *Journal of Navigation*, Vol. 27 pp. 239-47, 1974.
- [6] Fujii Y, Yamanouchi H, Tanaka K, Yamada K, Okuyama Y, Hirano, S. The behaviour of ships in

- limited waters. *Electronic Navigation Research Institute Papers* Vol. 19 pp. 1–14, 1978.
- [7] Goodwin E. A statistical study of ship domain. *The Journal of Navigation*, Vol. 28 pp. 328–44, 1975.
- [8] Macduff T. Probability of vessel collisions, *Ocean Industry*, Vol. 9 No. 9 pp. 144–148, 1974.
- [9] Montewka J, Hinz T, Kujala P, Matusiak J. Probability modeling of vessel collisions. *Reliable Engineering System Safety*, Vol. 95 pp 573–589, 2010.
- [10] Mou J.M, Tak C, Ligteringen H. Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering*, Vol. 37, pp. 483–490, 2010.
- [11] Pedersen P, Collision risk for fixed offshore structures close to high-density shipping lanes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 216 No.1 pp. 29–44, 2002.
- [12] Radmilović Z. *Transport na unutrašnjim plovim putevima*, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2007.
- [13] Radonjić A, Maraš V. A Stopping Maneuver Based Approach for Conflict Situation Assessments on the River Danube, *International Conference on Traffic and Transport Engineering - Belgrade, City Net Scientific Research Center Ltd. Belgrade*, pp. 272–278, 24–25th November 2016.
- [14] Szlapczynski R, A unified measure of collision risk derived from the concept of a ship domain, *Journal of Navigation*, Vol. 59 pp. 477–490, 2006.
- [15] Tan B, Otay E.N. Modeling and analysis of vessel casualties resulting from tanker traffic through narrow waterways, *Naval Research Logistics*, Vol. 46 pp. 871–892, 1999.
- [16] Tian C, Jinxian W, De-qi, X. Development of a quantitative risk assessment model for ship collisions in fairways, *Safety Science* Vol. 91 pp. 71–83, 2017.
- [17] Wang N. An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain, *Journal of Navigation*, Vol. 63, pp. 733–749, 2010.
- [18] Zhang H, Huang S. Dynamic control of intention priorities of human-like agents. *In Proceedings of the 17th European Conference on Artificial Intelligence, ECAT 2006*, Italy, 2006.

## SUMMARY

### TEMPORAL-SPATIAL ANALYSIS OF VESSELS COLLISION ON INLAND WATERWAYS

*This paper presents a new method for increasing the safety of navigation on inland waterways based on examples of conflict situations of two vessels. Some of the considered parameters of vessels movement given as dependent of undertaken maneuvers are the following: the time during which the two vessel cover different distances, an area in which there is a risk of collision (conflict area), the radius of the conflict area and speed of the two vessels. Conclusions related to safety of inland navigation are made based on prediction of future position, speed and course of the two vessels.*

*Two types of vessels, ie. self-propelled barge and a metal boat are used to form conflict area, calculate output results and to assess validity of the model.*

*We also conducted an analysis of the collision possibility between two vessels crossing each others courses on inland waterway with an aim to timely moments for performing anticollision maneuvers.*

**Key words:** *inland waterways, vessels collision, conflict area, self-propelled barge, metal boat*