Утицај површине попречног пресека канала на критичну брзину пловидбе

ИВАН В. ШКИЉАИЦА, Универзитет у Новом Саду,

Факултет техничких наука, Нови Сад

ВЛАДИМИР С. ШКИЉАИЦА, Универзитет у Новом Саду,

Факултет техничких наука, Нови Сад

Стручни рад

UDC: 656.62:626.1(497.113)

DOI: 10.5937/tehnika2005629S

Истраживања изложена у раду односе се на проучавање утицаја површине попречног пресека пловних канала који припадају систему Дунав-Тиса-Дунав (ДТД) на критичну брзину кретања бродова. Током истраживања биће проучаван међусобни однос површине попречног пресека појединих деоница из система канала и површине попречног пресека брода (на главном ребру) на стварање критичне брзине пловидбе једног типа брода за превоз терета депласманског типа наших бродарских компанија који је управо пројектован за пловидбу по систему канала ДТД. Познато је да величина прве критичне брзине пловидбе, ($v_{kr(1)}$) (брзина кретања при којој отпор брода почиње брзо да расте), представља основу за утврђивање допуштене брзине пловидбе (v_{pl}) брода познатих геометријских и експлоатационих карактеристика, по каналу познатог попречног пресека (Ω_K) тачно дефинисаних димензија.

Кључне речи: попречни пресек канала, тип брода, критична брзина пловидбе

1. УВОД

Постојећи бродови наших бродарских компанија предвиђени за пловидбу по каналима међусобно се разликују како по конструктивним (облик, депласман, главне димензије, погонски уређаји и др.) тако и по експлоатационим карактеристикама (носивост, брзина пловидбе, обим рада и др.). Одабрани тип брода који ће бити предмет истраживања налази се у експлоатацији у неколико наших бродарских компанија, посебно је пројектован за пловидбу управо по каналима из система ДТД и носи ознаку МТ750. Погон ових бродова остварује се помоћу два мотора типа „Фамос“, номиналне снаге 156 kW сваки, при 2000 обртаја у минути. Пропулзију остварују два пропелера типа Schottel, пречника 1000 mm при 755 обртаја у минути. Брод је пројектован за брзину пловидбе 13,00 km/h у мирној води. Најважније техничке и експлоатационе карактеристике усвојеног типа брода моторног теретњака приказане су у табели број 1.

Изглед одабраног брода типа МТ750 приказан је на слици 1. Брзина кретања бродова у каналима ограничава се до вредности прве критичне брзине. У супротном долази до рушења обала канала због интензивног деловања таласа изазваних кретањем бродова. Брзина кретања, при којој отпор брода почиње нагло да расте назива се прва критична брзина, $v_{kr(1)}$ (m/s) [8].

2. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КАНАЛА ХИДРОСИСТЕМА ДУНАВ-ТИСА-ДУНАВ

Поступак прорачуна критичне брзине брода усвојеног типа у функцији површине попречног пресека канала, $[v_{kr} = f(\Omega_K)]_{MT750}$, биће изведен по појединим деоницама канала из система Дунав-Тиса-Дунав које су предвиђене за кретање бродова чија регистрована носивост износи до 1.000 тона, а које се, истовремено, разликују по својим главним димензијама и по величини површине живог попречног пресека. На свим одабраним деоницама наведених каналских праваца дубина канала је истоветна, и износи $H_K=2,5$ m, док је гарантовани газ бродова $T_{max}=2,15$ m. Главне карактеристике праваца канала и одабраних деоница хидросистема Дунав-Тиса-Дунав на којима ће бити изведена провера критичне брзине пловидбе брода МТ750 приказане су у табели 2.

Адреса аутора: Иван Шкиљаица, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6

e-mail: ivanskiljaica@uns.ac.rs

Рад примљен: 24.05.2020.

Рад прихваћен: 07.10.2020.

Табела 1. Конструктивне и експлоатационе карактеристике брода MT750 [1]

Основне карактеристике брода MT750	
Дужина на конструктивној водној линији, L_{kvl} (m)	67,50
Ширина на конструктивној водној линији, B_{kvl} (m)	8,60
Највећи газ, T_{max} (m)	2,05
Истиснина $V(T_{max})$ (m ³)	998
Регистрована носивост, Q_r (t)	774
Коефицијент пуноће истиснине, δ	0,839
Коефицијент пуноће главног ребра, β	0,99
Коефицијент пуноће водне линије, α	0,95

Слика 1 - Генерални план брода MT750 [1]

Табела 2. Основне карактеристике одабраних канала [2]

Канал	Деоница, km	Ширина на водном огледалу, m	Пловна ширина канала, m	Површина попречног пресека, m ²
Бечеј-Богојево	0,00÷39,27 47,30÷90,22	50,0 50,0	27,0 21,0	90,0 100,0
Нови Сад-Савино Село	4,40÷39,10	58,0	35,0	140,0
Врбас-Бездан	0,00÷6,30	35,0	20,0	75,0
Банатска Паланка-Нови Бечеј	0,00÷43,26 27,50÷45,00 45,00÷72,00	112,0 64,0 64,0	70,0 52,0 28,0	400,0 200,0 150,0
Бегеј	0,00÷34,80	60,0	28,0	130,0

3. МЕТОДЕ ЗА ПРОРАЧУН КРИТИЧНЕ БРЗИНЕ ПЛОВИДБЕ

У примени је више различитих метода на основу којих може да се прорачуна критична брзина кретања бродова (v_{kr}) у пловним каналима.

1. Једна од метода која се примењује приликом прорачуна критичних брзина пловидбе бродова депласманског типа у каналима је Römisch метода [3], [4], [5].

После великог броја тестова са моделима бродова Römisch је 1989. године развио своју методу при чему рачунски израз има примену ако је испуњен услов $1,19 \leq H_K / T_{max} \leq 2,25$. Критична

брзина по Römisch методи рачуна се према изразу (1):

$$\left. \begin{aligned} v_{kr} &= C \cdot K_C; \\ C &= \sqrt{g \cdot H_K}; \\ K_C &= 0,2306 \cdot \log\left(\frac{1}{m}\right) + 0,0447 \end{aligned} \right\} (1)$$

при чему су: C – брзина простирања таласа у односу на дубину канала (m/s); K_C – коректурни коефицијент критичне брзине при пловидби у каналима; H_K – дубина воде у пловном каналу; m –

степен притиснутости воде у каналу од стране брода, који се рачуна помоћу израза, $m = \frac{F_{\odot}}{\Omega_K}$ тако што је

$F_{\odot}$ - површина попречног пресека брода на главном ребру (m^2), и рачуна се као производ: $F_{\odot} = B_{kvl} \cdot T_{max} \cdot \beta$, где је β - коефицијент пуноће главног ребра брода; Ω_K - површина попречног пресека пловног канала (m^2).

2. Други поступак којим може да се израчуна критична брзина кретања при којој отпор брода почиње брзо да расте - тзв. *прва критична брзина*, $v_{kr(1)}$ - описан је у методи коју је утврдио Институт за хидрологију Академије наука СССР (метода Г.И.Сухомела - [6], [7], [8]). Критична брзина према овом поступку рачуна се према изразу (2):

$$v_{kr(1)} = a_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H_K}{3 \cdot K^2 - 1}} \quad (2)$$

при чему су: a_0 - коефицијент, који износи $a_0=1,0$ за $H_K/T \geq 1,4$, док је $a_0=0,9$ за $H_K/T < 1,4$; K - коректурни коефицијент који зависи од односа B_{kvl}/L_{kvl} и рачуна се на основу израза:

$$K = 1 + 1,32 \cdot \frac{B_{kvl}}{L_{kvl}}$$

Описана метода Г. И. Сухомела базира се на две величине, и то: дубини воде у каналу (H_K) и коефицијенту K који зависи од главних димензија брода - дужине на водној линији L_{kvl} и ширине брода на водној линији B_{kvl} . Јасно се види да обе величине имају константне вредности: тако да је коефицијент $K = 1 + 1,32 \cdot \frac{8,60}{67,5} = 1,1681$ док је дуби-

на воде у свим одабраним каналима, без обзира на остале димензије и површину попречног пресека, идентична и једнака, $H_K = 2,5$ m. Примењујући метод Г.И. Сухомела добија се да је вредност критичне брзине кретања бродова у одабраним каналима идентична, да износи $v_{kr}=3,983$ m/s (14,339 km/h), и не зависи од површине попречног пресека канала.

3. Према трећој методи критична брзина (v_{kr}) кретања бродова по пловним каналима може да се одреди примењујући криве изложене у посебном графику (В. Н. Анфимов - [9], [6]), слика 2.

У овом случају вредности Фрудовог броја Fr_{H1} одређују прву критичну брзину кретања бродова у каналу трапезног попречног пресека, док вредности Фрудовог броја Fr_{H2} одређују другу критичну брзину. Друга критична брзина настаје када вредност Фрудовог броја постаје већа од 1, и може да се оствари само под условом да бродови остваре

велику брзину кретања што може да се постигне само уградњом огромних снага погонских постројења због чега се у пракси она не постиже.

Слика 2 - График за одређивање критичних брзина кретања бродова у каналу [6]

Параметри који дефинишу кретање бродова по пловном каналу (брзина пловидбе, и дубина канала) дефинисани су Фрудовим бројем по дубини канала који гласи [6]: $Fr_H = \frac{v}{\sqrt{g \cdot H_K}}$

Утврђивање прве критичне брзине кретања брода у каналу изводи се према следећој процедури. Према вредностима коефицијента трапезног облика пловног канала $b = \frac{B_{nvo} - B_d}{B_{nvo} + B_d}$ и степена притиснутости воде у каналу (m) с графика (слика 3) читавају се величине Fr_{H1} пројекцијом одговарајуће тачке пресека величина b и m на вертикалну осу. Тада, прва критична брзина прорачунава се на основу израза (3):

$$v_{kr(1)} = Fr_{H1} \cdot \sqrt{g \cdot H_K} \quad (3)$$

4. Четврта метода за прорачун критичне брзине пловидбе у каналима која се у раду представља је Schijf метода [5] [10]. Према овој методи критична брзина кретања бродова у каналима рачуна се на основу израза (4):

$$\frac{v_{kr}}{\sqrt{g \cdot R_K}} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(1 - \frac{F_{\odot}}{\Omega_K} + \frac{v_{kr}^2}{2 \cdot g \cdot R_K}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

где је R_K - хидраулички радијус попречног пресека канала када се у њему налази брод и он представља општу карактеристику ограниченог пресека пловног канала, а рачуна се из израза:

$$R_K = \frac{\Omega_K - F_{\odot}}{U_K - U_{\odot}}, \text{ при чему су } U_K - \text{оквашени обим}$$

попречног пресека пловног канала (m); U_{∞} - оквашени обим брода на главном ребру (m).

4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Према изложеној методологији следи прорачун параметара нужних за утврђивање величине критичне брзине (v_{kr}) кретања брода типа МТ750 по каналима из система ДТД усвојених праваца и познатих попречних пресека.

1. Како би се прва од наведених метода – Römisch метода могла применити неопходно је било да се одреде следећи параметри:

H_K – дубина воде у пловним каналима, $H_K=2,5$ m (усвојено);

F_{∞} - површина уроњеног дела попречног пресека брода на главном ребру, која износи:

$$F_{\infty} = B_{kvl} \cdot T_{\max} \cdot \beta = 8,60 \cdot 2,05 \cdot 0,99 = 17,4537 \text{ m}^2;$$

m - степен притиснутости воде у каналу од стране брода, $m = \frac{F_{\infty}}{\Omega_K}$, који за одабране правце

канала износе:

$$\begin{aligned} m_{75} &= 0,2327; & m_{90} &= 0,1939; & m_{100} &= 0,1745; \\ m_{130} &= 0,1342; & m_{140} &= 0,1246; & m_{150} &= 0,1163; \\ m_{200} &= 0,08726; & m_{400} &= 0,04363 \end{aligned}$$

(индекс уз ознаку степена приснутости m означава површину попречног пресека одабраног канала из система ДТД);

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

2. Метода В. Н. Анфимов којом се прорачунава критична брзина кретања бродова захтева познавање следећих параметара:

коэффициент облика пловног канала

$$b = \frac{B_{nvo} - B_d}{B_{nvo} + B_d},$$

при чему су B_{nvo} – ширина канала у нивоу водног огледала и B_d – ширина канала у дну. За одабране канале из система ДТД следи:

$$\begin{aligned} b_{75} &= 0,428; & b_{90} &= 0,538; & b_{100} &= 0,538; & b_{130} &= 0,578; \\ b_{140} &= 0,302; & b_{150} &= 0,571; & b_{200} &= 0,454; & b_{400} &= 0,382 \end{aligned}$$

(индекс уз ознаку коефицијента облика канала b означава површину попречног пресека канала);

m - степен притиснутости воде у каналу од стране брода (вредности истоветне као у методи Römisch); вредности Фрудовога броја према усвојеној дубини канала бирају се из приложеног дијаграма (слика 3).

3. Schijf метода заснива се на познавању следећих параметара:

F_{∞} - површина уроњеног дела попречног пресека брода на главном ребру, која је идентична методи Römisch, $F_{\infty} = 8,60 \cdot 2,05 \cdot 0,99 = 17,4537 \text{ m}^2$;

Ω_K – површина попречног пресека, што је позната величина за сваки од одабраних канала;

R_K – хидраулички радијус попречног пресека канала када се у њему налази брод, за чије рачунање је потребно познавати: оквашени обим попречног пресека пловног канала (U_K), што је позната величина за сваки од одабраних канала и оквашени обим брода на главном ребру (U_{∞}), који износи $U_{\infty} = 12,70 \text{ m}$;

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

На основу изложених поступака и познатих величина израчунате су критичне брзине кретања брода (v_{kr}), што се приказује у табели 3, док је на основу истих вредности конструисан дијаграм промене у функцији површине попречних пресека канала, слика 3.

Спроведени прорачуни показују да критична брзина кретања бродова при пловидби у каналима има смисла и постиже реалне вредности када је $\Omega_K > 0$. Утврђено је, такође, да промена критичне брзине према израчунатим подацима може да се опише функцијама облика

$$y = a_0 \cdot x^n + a_1 \cdot x^{n-1} + \dots + a_n.$$

Када се изврше замене: $y \rightarrow v_{kr}$ и $x \rightarrow \Omega_K$ тада функција промене критичне брзине добија облик:

$$v_{kr} = a_0 \cdot \Omega_K^n + a_1 \cdot \Omega_K^{n-1} + \dots + a_n.$$

Константе функције (коэффициенти функције) $a_0, a_1, \dots, a_n$ добијају своју вредност током непосредне конструкције криве промене брзине. На основу познатих вредности критичних брзина конструише се интегрална крива промене критичне брзине кретања брода серије МТ750, $v_{kr} = f(\Omega_K)$, која представља интегрисане податке конструисаних кривих по методама Römisch, В. Н. Анфимов и Schijf.

Очигледно је да се резултати израчунате критичне брзине кретања бродова по каналима из система ДТД применом методе В. Н. Анфимова, у функцији површине попречног пресека канала облика $v_{kr} = f(\Omega_K)$, практично се поклапају са резултатима које се добијају применом интегралне криве критичних брзина.

Насупрот томе, резултати добијени применом методама Römisch и Schijf битно се разликују од резултата примењене методе В. Н. Анфимова и добијених помоћу интегралне криве.

Табела 3. Израчунате вредности критичне брзине

Површина попречног пресека канала, Ω_K (m ²)	Метода Römisch v_{kr} (m/s)	Метода В.Н.Анфимов v_{kr} (m/s)	Метода Schjif v_{kr} (m/s)	Интегрална крива v_{kr} (m/s)
75	0,9444	1,8704	2,7131	1,6865
90	1,0349	2,0631	2,9912	1,8995
100	1,0871	2,1458	3,0915	2,0256
130	1,2174	2,3934	3,3627	2,3343
140	1,2546	2,5860	3,4161	2,4160
150	1,2884	2,6411	3,4733	2,4881
200	1,4309	2,7787	3,7684	2,7256
400	1,7747	3,1912	3,9742	2,9800

Слика 3 - Дијаграм промене критичних брзина у функцији површине попречног пресека канала $v_{kr} = f(\Omega_K)$

5. ЗАКЉУЧАК

У раду су приказане четири методе за прорачун критичне брзине пловидбе брода (од више постојећих типова) који припада серији МТ750 и који се од осталих типова сличних бродова разликује по томе што је према постављеном пројектном задатку пројектован и грађен тако да му облик и димензије управо одговарају за потребе пловидбе по каналима из система Дунав-Тиса-Дунав.

Метода Г. И. Сухомела карактеристична је по томе што критична брзина пловидбе бродова не зависи од величине површине попречног пресека

канала, $v_{kr} \neq f(\Omega_K)$, те да је за одабрани брод МТ750 у посматраним каналима из система ДТД идентична и износи

$$v_{kr} = 3,983 \text{ m/s (14,339 km/h)}.$$

Сходно томе, бродовима ове серије препоручена брзина кретања по одабраним каналима износи

$$v_{pl} \leq 0,9 \cdot v_{kr} \leq 3,5847 \text{ m/s},$$

односно

$$v_{pl(max)} = 12,9049 \text{ km/h}.$$

Примена рачунске Römisch методе одликује се врло малим вредностима критичних брзина кретања бродова.

Тако, брод серије MT750, у каналу чија површина попречног пресека износи 400 m^2 развија критичну брзину од свега $1,7747 \text{ m/s}$ (или $6,3889 \text{ km/h}$) што, разуме се, смањује препоручену брзину пловидбе бродова на вредност од

$$v_{pl} \leq 0,9 \cdot v_{kr} \leq 5,7500 \text{ km/h.}$$

Насупрот томе, примена Schjif методе омогућава бродовима кретање великим критичним брзинама. Према овој методи, за канал чија површина попречног пресека износи 400 m^2 брод серије MT750 може да постигне критичну брзину од $3,9742 \text{ m/s}$ (или $14,3071 \text{ km/h}$) – што је, готово, идентично брзини добијеној по рачунској методи Г. И. Сухомела.

Резултати израчунате критичне брзине кретања бродова по каналима из система ДТД применом методе В. Н. Анфимова, у функцији површине попречног пресека канала облика $v_{kr} = f(\Omega_K)$, практично се поклапају са резултатима које се добијају применом интегралне криве критичних брзина. Тако, за канал чија површина попречног пресека износи 400 m^2 критична брзина израчуната методом В.Н.Анфимова већа је од брзине израчунате помоћу интегралне криве за свега $7,087\%$. Према интегралној кривој за канал површине 400 m^2 критична брзина износи $2,9800 \text{ m/s}$, односно $10,728 \text{ km/h}$. На основу тога препоручена брзина пловидбе износи $v_{pl} \leq 0,9 \cdot v_{kr} \leq 9,6552 \text{ km/h}$.

Пажљивим прегледом добијених и изложених резултата уочава се закључак, на основу којег следи да брод одабраног типа MT750 (што важи и за друге сличне типове бродова) који се креће истим каналским правцем, а различитим деоницама и које се међусобно разликују по површини попречног пресека, може да повећава односно смањује брзину у зависности од деонице на којој се тренутно налази (нпр. правац Бечеј-Богојево или Банатска Паланка-Нови Бечеј). Истоветно важи и када брод прелази из једног каналског правца у други, као на пример, када из Бегеја упловљава у канал Банатска Паланка-Нови Бечеј, итд.

На крају, потребно је да се нагласи, да се препоручене брзине кретања бродова различитог типа при пловидби по каналима из система ДТД могу добити применом представљених рачунских метода у комбинацији са експериментима које треба реализовати са реалним бродовима у реалним условима пловидбе.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад настао је као део истраживања у оквиру пројекта „Примена савремених дидактичких алата у функцији унапређења саобраћајног образовања и научно-истраживачког рада“. Реализатор пројекта: Департмана за саобраћај, Факултета техничких наука.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Студија техно-економских карактеристика постојећих моторних теретњака, ФТН, Нови Сад, Институт за хидраулику и саобраћај, Нови Сад, 1991.
- [2] Архива ЈКП Воде Војводине, Сектор за хидро системе ДТД
- [3] В. Шкиљаица, И. Шкиљаица, А. Радоњић, В. Мараш, Д. Пјевчевић, *Додатни уроњај бродова унутрашње пловидбе при кретању по пловном путу ограничене дубине и ширине – процедура за прорачун – техничко решење*, Универзитет у Новом Саду Факултет техничких наука, 2018.
- [4] Briggs, M. J, *Ship squat predictions for Ship/Tow simulator*, Vicksburg, US Army Engineer Research and Development Center, 2006;
- [5] Briggs, M. J, Comparasion of Measured Ship squat with Numerical and Empirical Methods, *Journal of Ship Research*, Volume 57, Number 2, 2013;
- [6] Анфимов, В. Н, Ваганов, Г. И, Павленко, В. Г, Судовые тяговые расчеты, *Транспорт*, Москва 1978;
- [7] В. Г. Павленко, Маневренные качества речных судов, *Транспорт*, Москва, 1979;
- [8] И. Шкиљаица, В. Шкиљаица, Прилог одређивању критичне и допуштене брзине кретања бродова у пловним каналима, *Техника*, број 1, Савез инжењера и техничара Србије, Београд, 2020.;
- [9] Ваганов, Г. И., Воронин, В. Ф., Шанчурова, В. К, Тяга судов, *Транспорт*, Москва, 1986;
- [10] Škiljaica I, Škiljaica V, Navigation characteristics of Danube subsection Mohovo channel in order to define the value of vessel's draught, *International symposium on electronics in traffic ISEP*, Ljubljana, Electrotechnical association of Slovenia, 2014;

SUMMARY

INFLUENCE OF THE AREA OF THE CHANNEL'S CROSS-SECTION AREA ON THE CRITICAL SPEED OF NAVIGATION

Research presented in the paper refers to calculation of the influence of navigable channel's cross-section area, which belong to the Danube-Tisza-Danube (DTD) system, on critical speed of navigation of ships. During research relation between area of the channel's cross-section of certain sections of the channel on creating critical speed of navigation for one type of cargo ship of Serbian shipping companies which was designed for navigation on the channel network of the DTD system. It is known that the value of the first critical speed ($v_{kr(1)}$), presents the base to determine the allowed speed of navigation (v_{pl}) for the ship of known geometric and exploitation characteristic in the channel of known cross-sectional area (Ω_K) with precisely defined dimensions.

Key words: *channel's cross-sectional area, critical speed of navigation*