Прилог одређивању критичне и допуштене брзине кретања бродова у пловним каналима

ИВАН В. ШКИЉАИЦА, Универзитет у Новом Саду,

Факултет техничких наука, Нови Сад,

ВЛАДИМИР С. ШКИЉАИЦА, Универзитет у Новом Саду, DOI: 10.5937/tehnika2001067S

Факултет техничких наука, Нови Сад,

Оригинални научни рад

UDC: 626.71

У односу на димензије пловног пута бродови депласманског типа могу да се нађу у три ситуације: 1) пловидба у дубокој води, када кретање брода није ограничено ни по дубини ни по ширини пловног пута, 2) пловидба у плиткој води, када је кретање брода ограничено по дубини, и 3) пловидба у каналу, када је кретање брода ограничено и по дубини и по ширини пловног пута. Истраживања изложена у раду односе се на основне карактеристике пловидбе бродова за превоз терета депласманског типа наших бродарских компанија који, у складу са својим главним димензијама, могу да користе мрежу пловних канала хидросистема Дунав-Тиса-Дунав (ХС ДТД). У раду се излаже поступак прорачуна прве критичне брзине кретања бродова, $v_{kr(1)}$, која представља основу за утврђивање допуштене брзине пловидбе брода познатих карактеристика (v_{pl}) по каналу познатог попречног пресека (Ω_K) тачно дефинисаних димензија.

Кључне речи: пловни канал, критична брзина брзина пловидбе

1. УВОД

Познато је, да при кретању бродова у пловном путу ограничених димензија, тј. у путу мале дубине и пловним каналима долази до појава које нису карактеристичне за њихову пловидбу по пловном путу који није ограничен ни по дубини ни по ширини. У реалним условима пловидбе депласманских бродова по пловном путу мале дубине и каналима уочавају се следеће карактеристичне појаве: кретање (струјање) воде које је супротног смера у односу на смер кретања брода испод дна и поред бокова брода; промењени систем таласа око брода; повећање газа брода (појава тзв. динамичког уроњаја); појава области критичних брзина; смањење нивоа воде у каналу и повећање укупног отпора брода.

Треба нагласити да је највећи број истраживања [1], [2] и [3] посвећен повећању укупног отпора брода у условима пловидбе у пловним кана-

лима при чему је о томе објављен велики број научних и стручних радова и друге литературе због чега та појава неће бити предмет истраживања у овом раду. У даљем току излагања посебан правац истраживања биће усмерен на утврђивање оних параметара којима се дефинише критична брзина пловидбе за четири типа - бродова депласманског типа у условима пловног канала познатог попречног пресека, на основу које се утврђује допуштена брзина или препоручена брзина кретања бродова.

2. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ БРОВОВА-МОТОРНИХ ТЕРЕТЊАКА

Постојећи бродови депласманског типа наших бродарских компанија 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.). Бродови чије ће карактеристике пловидбе у каналима бити изучаване, разврстани су на основу идентичности конструктивних и експлоатационих карактеристика у четири групе, и то: МТ700, МТ750, МТ850 и МТ1000. Најважније техничке и експлоатационе карактеристике усвојених типова бродова приказане су у табели број 1.

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

e-mail: ivan.skiljaica@uns.ac.rs

Рад примљен: 14.01.2020.

Рад прихваћен: 14.02.2020.

Табела 1. Конструктивне и експлоатационе карактеристике бродова [7]

Основне карактеристике	Тип брода			
	MT700	MT750	MT850	MT1000
Дужина на констр. водној линији, L_{kvl} (m)	60,05	67,50	69,63	75,60
Ширина на констр. водној линији, B_{kvl} (m)	8,61	8,60	8,48	10,80
Највећи газ, T_{max} (m)	2,05	2,05	2,15	2,20
Истиснина $V(T_{max})$ (m ³)	903	998	1054	1450
Регистрована носивост, Q_r (t)	720	774	890	1000
Коефицијент пуноће истиснине, δ	0,852	0,839	0,846	0,807
Коефицијент пуноће главног ребра, β	0,98	0,99	0,995	0,99
Коефицијент пуноће водне линије, α	0,925	0,95	0,945	0,95

Слика 1 - Изглед бродова- одабраних типова [7]

Слика 2 - Попречни профил на правцу Нови Сад-Савино Село, км 20+633 [10]

3. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ОДАБРАНОГ КАНАЛА ИЗ СИСТЕМА ДУНАВ-ТИСА-ДУНАВ

Поступак прорачуна критичне брзине бродова усвојених типова биће изведен на примеру профила канала Нови Сад-Савино Село. У основи, на овом делу канала, сви попречни профили су слични, при чему нагиб косина у висини нивоа водног огледала износи око 1:3. Оријентациони облик попречних профила на правцу Нови Сад-Савино Село приказан је на слици 2.

4. ПРАКТИЧНИ МЕТОДИ ЗА ПРОРАЧУН УСВОЈЕНИХ ВЕЛИЧИНА

Заједнички параметри који дефинишу кретање бродова по пловним каналима су:

Фрудов број по дубини канала [5]:

$$Fr_H = \frac{v}{\sqrt{g \cdot H_K}} \quad (1)$$

степен притиснутости воде у каналу:

$$m = \frac{F_{\otimes}}{\Omega_K} = \frac{B_{kvl} \cdot T_{max} \cdot \beta}{\bar{B}_K \cdot H_K} \quad (2)$$

при чему су: v – брзина кретања брода (m/s), H_K – дубина воде у каналу (m), g – убрзање земљине теже (m/s²), $F_{\otimes}$ – површина главног ребра брода

(m²), средња ширина канала: $\bar{B}_K = \frac{B_{nvo} + B_d}{2}$, где

су: B_{nvo} – ширина канала у нивоу водног огледала (m) и B_d – ширина канала на дну (m), B_{kvl} – ширина на КВЛ, T_{max} – највеће гажење, β – коефицијент пуноће главног ребра.

5. ПОСТУПАК ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ КРИТИЧНЕ БРЗИНЕ ПЛОВИДБЕ

Приликом кретања брода у каналу могу да се појаве две критичне брзине: $v_{kr(1)}$ и $v_{kr(2)}$. Када се постигне прва критична брзина отпор воде при кретању брода значајно расте, протицање воде у близини брода добија бурни карактер стварајући опасност за очување обала и дна канала.

Друга критична брзина јавља се као доња граница надкритичних режима приликом кретања бродова у каналу. При брзини $v > v_{kr(2)}$ ниво воде у каналу се повећава, а уместо тока супротног смера настаје повратно струјање у близини брода у покрету. Уобичајени депласмански речни бродови не могу да достигну изнадкритичне брзине кретања због недовољне снаге погонских уређаја. За одређивање допуштених брзина кретања

бродова по каналима може да се усвоји препорука [4], израз 3:

$$v_{pl} \leq 0,95 \cdot v_{kr(1)} \quad (3)$$

Брзина кретања, при којој отпор брода почиње брзо да расте – прва критична брзина, $v_{kr(1)}$ [2] – може да се израчуна према методи Г.И. Ваганова, израз 4:

$$v_{kr(1)} = a_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H_K}{3 \cdot K^2 - 1}} \quad (4)$$

где су: a_0 – коефицијент, који износи $a_0 = 1,0$ за $H_K/T \geq 1,4$, док је $a_0 = 0,9$ за $H_K/T < 1,4$, при чему је K – коефицијент који зависи од односа B_{kvl}/L_{kvl} и рачуна се на основу израза: $K = 1 + 1,32 \cdot \frac{B_{kvl}}{L_{kvl}}$.

Критична брзина (v_{kr}) кретања бродова по пловним каналима може да се одреди и помоћу графика, метога В.Г. Павленко [8], чији главни параметри су приказани на слици 3.

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.

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

степену стиснутости воде у каналу (m) с графика (слика 3) читавају се величине Fr_{H1} пројекцијом одговарајуће тачке пресека величина b и m на вертикалну осу. Прва критична брзина прорачунава се на основу израза 5:

$$v_{kr(1)} = Fr_{H1} \cdot \sqrt{g \cdot H_K} \quad (5)$$

Једна од метода која може да се примењује приликом прорачуна критичних брзина пловидбе бродова депласманског типа је Römisch метода [9]. Ова метода састоји се из више делова тако да има примену како у пловним путевима који немају ограничења ни по дубини нити по ширини, тако и у пловним путевима ограничених димензија и у пловним каналима. Величина критичне брзине по Römisch методи рачуна се према изразу (6):

$$\left. \begin{aligned} v_{kr(1)} &= C \cdot K_C; \\ C &= \sqrt{g \cdot H_K}; \\ K_C &= 0,2306 \cdot \log\left(\frac{1}{m}\right) + 0,0447 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

при чему је K_C – коректурни коефицијент критичне брзине за пловни канал.

Према изложеном следи, да брзину кретања депласманских бродова-моторних теретњака у каналима трапезног попречног пресека ограничавају два услова, и то: 1) услов очувања (не разарања) обала и дна канала, и 2) услов економичности и сигурности кретања брода при брзинама $v_{pl} \leq 0,95 \cdot v_{kr(1)}$.

Резултати истраживања

Према изложеним методама [4] и [6] следи прорачун параметара нужних за утврђивање величине прве критичне брзине ($v_{kr(1)}$) кретања бродова по каналу усвојеног попречног пресека. Према рачунском поступку Г. И. Ваганова [4] утврђивање вредности прве критичне брзине заснива се на следећим параметрима:

- дубина воде у каналу: $H_K = 2,5$ m;
- коефицијент K зависи од типа брода тако да је: $K_{MT700} = 1,189$; $K_{MT750} = 1,168$; $K_{MT850} = 1,161$; $K_{MT1000} = 1,188$;
- однос дубине канала (H_K) према газу бродова (T) усвојених типова:

$$\left(\frac{H_K}{T}\right)_{MT700} = 1,219; \left(\frac{H_K}{T}\right)_{MT750} = 1,219;$$

$$\left(\frac{H_K}{T}\right)_{MT850} = 1,162; \left(\frac{H_K}{T}\right)_{MT1000} = 1,136$$

- будући да су односи $H_K/T < 1,4$ усваја се коефицијент: $a_0 = 0,9$.

На основу изложених величина следе вредности прве критичне брзине ($v_{kr(1)}$) за усвојене типове бродова:

Према поступку В. Г. Павленка, који укључује примену графика (слика 3) утврђивање вредности прве критичне брзине базира се на следећим параметрима:

- дубина воде у каналу: $H_K = 2,5$ m;
- коефицијента трапезног облика пловног канала: $b_1 = 0,302 \approx 0,3$;
- средња ширина канала на одабраном профилу: $\bar{B}_K = 32,25$ m;
- степен притиснутости воде у каналу зависи од типа брода и износи: $m_{MT700} = 0,2145$; $m_{MT750} = 0,2164$; $m_{MT850} = 0,2250$; $m_{MT1000} = 0,2917$;
- вредности Фрудовог броја бирају се у зависности од вредности коефицијента облика пловног канала и степена притиснутости воде у каналу, тј. : $Fr = f(b_1; m)$.

За одабране типове бродова следе подаци о допуштеним (препорученим) брзинама пловидбе у

каналу усвојеног попречног пресека према све три методе, што се приказује у табели 2.

На основу података из табеле 2 конструисан је дијаграм брзине пловидбе у функцији депласмана бродова (слика 4).

Слика 3 - График за утврђивање вредности прве критичне брзине [4], [6]

6. ЗАКЉУЧАК

Полазећи од усвојеног става да брзину кретања депласманских бродова у каналима ограничавају два услова, и то услов очувања (не разарања) обала и дна канала као и услов економичности и сигурности кретања брода, изведени прорачуни прве критичне брзине усвојених типова бродова методама препоручених у литератури дају различите резултате.

Применом Г. И. Ваганов методе, са порастом главних (конструктивних) димензија и депласмана брода препоручена брзина кретања по каналу (v_{pl}) добија све веће вредности, тако да је ова брзина бродова типа MT1000 већа од препоручене брзине брода с најмањим главним димензијама и најмањег депласмана, типа MT750 за 8,49%.

Истовремено, применом методе В. Г. Павленка која се заснива на коришћењу одговарајућег дијаграма за одређивање критичних брзина у каналима трапезног попречног пресека, резултати прорачуна добијају супротне вредности. Наиме, са порастом главних (конструктивних) димензија и депласмана брода препоручена брзина кретања по каналу (v_{pl}) добија све мање вредности, тако да је ова брзина бродова типа MT1000 мања од препоручене брзине брода с најмањим главним димензијама и најмањег депласмана, типа MT750 за 4,019%. Осим тога, ова метода (у односу на рачунску) препоручује знатно

мање брзине кретања бродова по пловним каналима за, у просеку 20,946%.

Насупрот првим двама методама, примена Römisch методе даје неочекивано другачије вредности могућих брзина пловидбе за сва четири типа проучаваних бродова по пловном каналу

усвојеног правца. Ако израчуната средња брзина пловидбе посматраних бродова по методи Г. И. Ваганова износи 8,302 km/h, а по методи В. Г. Павленка 6,563 km/h, тада средња брзина пловидбе прорачуната по методи Römisch (3,213 km/h) има изразито мале вредности.

Табела 2. Допуштене брзине пловидбе према усвојеним методама

Брзина	Тип брода			
	MT 700	MT 750	MT 850	MT 1000
Метода Г.И. Ваганов				
v_{pl} [km/h]	8,021	8,21	8,276	8,702
Метода В.Г. Павленко				
v_{pl} [km/h]	6,693	6,653	6,483	6,424
Метода Römisch				
v_{pl} [km/h]	3,368	3,353	3,287	2,846

На основу изложених метода прорачуна брзина пловидбе следи да се за утврђивање ових брзина морају детаљно изучити и други начини рачунања које научна и стручна литература препоручују. Осим тога, необично важно је да се приступи систематским испитивањима пловидбе у реалним условима постојећих бродова на главним правцима из система ДТД при различитим дубинама и за различите величине газа бродова. Прелиминарни прорачуни изведени са усвојеним типовима бродова на одабраном правцу при дубини канала од 2,15 метара показују значајно мање вредности допуштених брзина кретања у односу на брзине истих

бродова при дубини у каналу од 2,5 метара. Веома је важно нагласити да је тачно одређење могуће (допуштене) брзине пловидбе у каналима од изузетне важности у процесу експлоатације бродова, будући да резултативни показатељи њиховог рада у великој мери (осим носивости и снаге погонских мотора) зависе управо од могуће брзине пловидбе.

Напомена: рад је настао је из истраживања које се обавља у оквиру пројеката „Модел интеграције транспортног система“ (евиденциони број 36024) који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја

Слика 4 - Дијаграм брзине по депласману применом различитих метода

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Čolić V, *Istraživanje plovidbenih, prevoznih, energetskih i propulziono-potisnih osobenosti dunavskih brodova potiskivača*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2006,
- [2] Čolić V, Vukadinović, K, *Istraživanje veličine otpora pri plovidbu dunavskih teretnih brodova*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2004.
- [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] Ваганов, Г. И, Воронин, В. Ф, Шанчурова, В. К, *Тяга судов*, Транспорт, Москва, 1986;
- [5] Анфимов, В. Н, Ваганов, Г. И, Павленко, В. Г, *Судовые тяговые расчеты*, Транспорт, Москва 1978;
- [6] Головников, В. И, Суколенов, А. Е, Шанчурова, В.К. *Основы организации работы флота и портов*, Транспорт, Москва, 1976;
- [7] Студија техно-економских карактеристика постојећих моторних теретњака, ФТН, Нови Сад, Институт за хидраулику и саобраћај, Нови Сад, 1991.
- [8] В. Г. Павленко, *Маневренные качества речных судов*, Транспорт, Москва, 1979;
- [9] Vukić M, Comparative analysis of methods for calculating the ship squat, *7-th International Conference on Ports and Waterways – POWA 2012*, Zagreb, Croatia, September 2012.
- [10] Архива ЈКП Воде Војводине, Сектор за хидросистеме ДТД

SUMMARY

CONTRIBUTION TO DETERMINATION OF CRITICAL SPEED AND ALLOWED SPEED OF NAVIGATION FOR VESSELS IN NAVIGABLE CANALS

Depending on the dimensions of a waterway displacement type ships can be in three situations: 1) navigation in deep water, when ship's movement isn't limited either by depth or by width of the waterway, 2) shallow water navigation, when ship's movement is limited by depth, and 3) navigation in canals when ship's movement is limited both by depth and by width of the waterway. Research presented in the paper refer to basic navigational characteristics of displacement type cargo ships (self-propelled cargo ships) of Serbian shipping companies, which in accordance with their main dimensions can be used on the network of navigable canals of the hydro system Danube-Tisza-Danube. Paper presents procedure for determining the first critical speed of navigation $v_{kr(1)}$, which presents the base for determining the allowed speed of navigation of the ship of known characteristics (v_{pl}) on canal of known cross sectional area (Ω_K) with precisely defined dimensions.

Key words: navigable canals, critical speed of navigation, speed of navigation