

Додатни уроњај бродова унутрашње пловидбе при кретању по пловним каналима – процедуре прорачуна

ИВАН В. ШКИЉАИЦА, Универзитет у Новом Саду,
Факултет техничких наука, Нови Сад
ORCID: 0000-0003-0073-5747

ВЛАДИМИР С. ШКИЉАИЦА, Универзитет у Новом Саду,
Факултет техничких наука Нови Сад
ORCID: 0000-0002-9086-4667

МИРЈАНА И. ЖИВКОВИЋ, Јавно водопривредно предузеће
„Воде Војводине“ Нови Сад
ORCID: 0009-0001-7476-5060

Стручни рад
UDC: 629.542.2.012.444
DOI: 10.5937/tehnika2406727S

У раду су анализирани услови кретања бродова за превоз терета депласманског типа наших бродарских компанија по пловним каналима у циљу утврђивања појаве додатног повећања газа бродова, тзв. додатни или динамички уроњај брода. Методе примењене у раду настале су као резултат спроведених страних истраживања са бродовима у реалним условима пловидбе као и посебним базенима, потом објављених у литератури на енглеском и руском језику. Циљ аутора био је да се, на основу у раду објављених метода, испита појава додатног уроњаја бродова и утврди утицај кретања бродова на ову појаву као нови корак у припремама за тражење оптималног режима кретања бродова по пловним каналима. Прорачунима су подвргнути самоходни (моторни) бродови за превоз терета различитих типова у каналима променљиве површине попречног пресека и при различитим брзинама пловидбе.

Кључне речи: додатни уроњај, брзина пловидбе, пловни канал, брод депласманског типа, повећање газа

1. УВОД - ОПИС ПРОБЛЕМА

У односу на димензије пловног пута брод може да се нађе у три ситуације, и то: 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 али не и по ширини; 3) пловидба у каналу, када је кретање брода ограничено и по дубини и по ширини.

При кретању брода у каналу уочавају се исте појаве као и у путу мале дубине и (теоретски) неограничене ширине, само у знатно израженијем облику. У исто време настају и неке карактеристичне особености, као што су: (1) кретање масе воде

(струјање) супротног смера (при докритичним брзинама) у односу на смер кретања брода; (2) релативно смањење нивоа воде у суженом пресеку канала; (3) при кретању брода у каналу уочава се не једна критична брзина (као у плиткој води) већ појава области критичних брзина; (4) промена система таласа у поређењу с образовањем таласа приликом кретања у дубокој води; (5) додатни (динамички) уроњај брода; (6) повећање отпора воде приликом пловидбе у каналу.

Кретање масе воде око трупа брода (струјање услед стешњености) има смер који је супротан у односу на смер кретања брода, и то не само испод дна брода већ и по његовим боковима, те представља својеврстан облик наилазећег тока. Под током супротног смера подразумева се кретање воде, притиснуте бродом, која тежи да изједначи нивое и преливањем повећаном брзином са вишег нивоа испред прамца брода прелази у област нижег нивоа иза крме брода. Појава снижења нивоа воде испод дна и по боковима брода изазива повећања

Адреса аутора: Иван Шкиљаица, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
e-mail: ivan.skiljaica@uns.ac.rs
Rad primljen: 10.04.2024.
Rad prihvaćen: 31.10.2024.

његовог газа, када се јавља тзв. додатни (динамички) уроњај брода.

Проучавање додатног (динамичког) уроњаја до којег може да дође током пловидбе тесно је повезано за познавање величине-висине слободног бока бродова. Треба знати да је висина слободног бока брода (f) једна од најзначајнијих димензија бродског трупа и мери се на главном ребру од линије највећег дозвољеног газа T_{max} (при конструктивној водној линији потпуно утовареног брода, KVL) до ивице палубе. Рачуна се као разлика између конструктивне висине трупа брода на главном ребру (h) и највећег (конструктивног) газа T_{max} , тј. $f = h - T_{max}$. Висина слободног бока одређује величину тзв. резервног депласмана, тј. оне истиснине коју би брод остварио у случају уроњавања изнад линије KVL све до ивице палубе, а да при том не изгуби пловност. Резервни депласман је од пресудног значаја приликом удеса, као што је нпр. продор воде у брод јер омогућава добитак у времену док не буду предузете одговарајуће мере за спасавање брода [3], [6], [7].

Други разлог познавања додатног уроњаја бродова везан је за смањење резервне дубине између

дна брода и дна пловног пута (h_T). При малој резервној дубини испод дна брода, када је $h_T/T_{max} < 1,1$ и при кретању брода критичном брзином (v_{kr}) могуће је, не само краткотрајно додиривање дна пловног пута, већ и приљубљивање бродова за дно, што за последицу има могућност оштећења пропульзивног и/или крмиларског система [3].

2. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ БРОДОВА

Предмет истраживања у овом раду су последице настале кретањем бродова за превоз терета са сопственим погоном у пловним каналима из система Дунав-Тиса-Дунав (ДТД) [1]. Постојећи бродови овог типа наших бродарских компанија међусобно се разликују и по конструктивним и по експлоатационим карактеристикама.

Бродови, чији ће утицај бити истраживан на појаву додатног уроњаја брода у каналима, разврстани су на основу идентичних конструктивних карактеристика у пет група, и то: МТ700, МТ850, МТ1000, МТ1500 и МТ2600. Најважније техничке и експлоатационе карактеристике усвојених типова бродова приказане су у табели број 1.

Табела 1. Конструктивне и експлоатационе карактеристике бродова

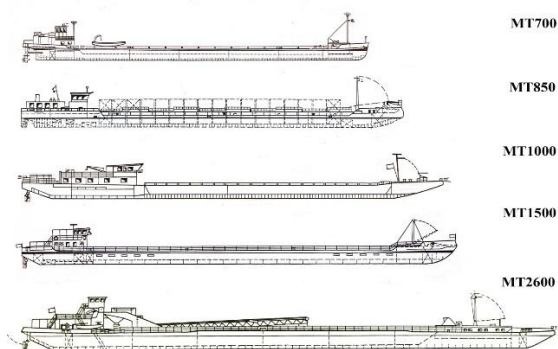
Основне Карактеристике	Тип брода				
	МТ700	МТ850	МТ1000	МТ1500	МТ2600
LKVL (m)	60,05	69,63	75,60	80,00	96,00
BKVL (m)	8,61	8,48	10,80	11,40	13,80
Tmax (m)	2,05	2,15	2,20	2,50	3,15
T0 (m)	0,44	0,59	0,80	0,55	0,71
V(Tmax) (m3)	903	1054	1450	1930	3580
Qr (t)	720	890	1000	1576	2770
δ	0,852	0,830	0,870	0,846	0,857
β	0,98	0,995	0,995	0,995	0,990
α	0,925	0,945	0,95	0,95	0,970

Објашњење ознака: L_{KVL} -дужина брода на конструктивној водној линији; B_{KVL} -ширина брода на конструктивној водној линији; T_{max} -највећи газ брода; T_0 -најмањи газ брода; $V(T_{max})$ -истиснина брода у функцији највећег газа; Q_r -регистрована (највећа) носивост брода; δ -коэффициент пуноће бродског трупа при T_{max} ; β -коэффициент пуноће главног ребра при T_{max} ; α -коэффициент пуноће водне линије при T_{max} .

Из табеле 1 види се да бродови који припадају типу МТ1500 и МТ2600 имају конструктивни газ који је већи у односу на дозвољени газ за канале из овог система ($T > 2,15$ m), због чега ће у поступцима прорачуна бити употребљен онај газ који је дозвољен за пловидбу у каналима из система ДТД. Осим тога, бродови типа МТ2600, будући да имају дужину и ширину трупа која је значајно већа од

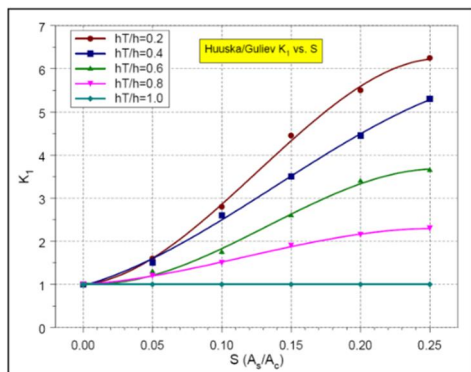
дужине комора бродских преводница на каналима система ДТД, и не могу да уплове нити у један од канала овог система, имају само теоретски значај у поступку истраживања појаве додатног уроњаја брода.

На слици 1 приказани су генерални планови одабраних типова бродова.



Слика 1 - Изглед одабраних моторних теретњака 3. Основне карактеристике пловних канала из система ДТД

Пловни канали хидросистема ДТД пројектовани су у три разреда према величини меродавног пловила, и то за носивости 1000, 500 и 200 тона [2]. На каналској мрежи, као вештачким пловним путевима, хидролошке и морфолошке карактеристике су одређене на основу пројектованих конструктивних решења и режима експлоатације. Водостаји на каналима режимски се држе у потребним границама које обезбеђују номиналне карактеристике. Брзина тока у каналима је безначајна са гледишта пловидбе.



Слика 2 - Коректурни коефицијент (K_1) [4]

Димензије пловидбених профила канала су познате и на основу њих су утврђени пловидбени капацитети тих канала. У основи сви попречни профили су слични, без обзира да ли им је облик полигоналан или параболичан. Нагиб косине у висини водног огледала је, приближно 1:3. Сваком од канала дефинисани су: позиција деонице, ширине (у нивоу водног огледала, пловна ширина и ширина у дну канала), површина попречног пресека, минимални полупречник кривине, пловна дубина и дозвољена носивост бродова. Оријентациони облици усвојених попречних профила пловних канала (са уцртаним пресеком одабраних типова бродова на главном ребру) приказани су на слици 2.

У циљу добијања ширине и целовитости резултата за потребе прорачуна величине брзине

воде која се креће смером који је супротан кретању брода (v_s), а поготово због прецизног дефинисања брзине струјања на косинама (v_{s1}) и дну канала (v_{s2}), усвојени су пловни канали чије површине попречног пресека износе 75, 90, 100, 130, 140, 150, 200, 300 и 400 m².

4. ПРЕДЛОГ РАЧУНСКИХ МЕТОДА ЗА ПРОРАЧУН ДОДАТНОГ УРОЊАЈА БРОДОВА

Како је наглашено, приликом кретања бродова у каналу докритичним брзинама ($v < v_{kr}$) настаје додатна маса воде испред прамца брода због чега долази до њеног интензивног струјања чији смер је супротан смеру кретања брода. При том, брзина опструјавања око трупа брода значајно расте, због чега настаје пад слободне површине – гледано од прамца према крми брода, при чему брод добија додатно уроњење крменог дела. Ова појава, с којом је неопходно рачунати у пракси вођења бродова назива се обично, додатни уроњај или динамички уроњај брода.

На основу доступне литературе [6],[7] види се да су експерименти са бродовима у реалним условима пловидбе извршени при следећим основним претпоставкама: (1) сматра се да у каналу нема кретања водене масе; (2) брод се креће по праволинијској путањи у оси симетрије канала константном брзином (v) без претега и нагнутости на један од бокова (случај равне кобилнице); (3) газ брода у односу на слободну површину се не мења; (4) брзина насталог струјања супротног смера (Δv) је константна у датом моменту времена у попречном пресеку канала док је снижење нивоа (ΔH) константно по ширини канала.

Приликом изучавања појаве додатног уроњаја бродова при кретању у пловним каналима неопходно је дефинисати основне величине, као што су:

1. Утицајна ширина канала, B_B [4], [5] која се рачуна помоћу израза (1):

$$B_B = [7,7 + 20 \cdot (1 - \delta)^2] \cdot B \quad (1)$$

Величина утицајне ширине канала зависи од типа брода за који се рачуна вредност додатног уроњаја, при чему је δ – коефицијент пуноће истиснине а B – ширина трупа брода на конструктивној водној линији. Како би додатни уроњај брода био што је могуће мањи потребно је да ширина канала у дну (B_d) буде већа од утицајне ширине, $B_d > B_B$.

2. Коефицијент утицаја пловног пута, S [4], [5] представља однос између уроњене површине попречног пресека брода на главном ребру (F_{\otimes}) и

површине попречног пресека канала (Ω_K), и рачуна се помоћу израза (2):

$$S = \frac{F_{\otimes}}{\Omega_K} \quad (2)$$

3. У поступцима прорачуна додатног уроњаја бродова важан чинилац је и *коэффициент повратне брзине* S_2 [4], који представља однос између површине попречног пресека брода на главном ребру F_{\otimes} и нето површине попречног пресека пловног пута, помоћу израза (3):

$$S_2 = \frac{F_{\otimes}}{\Omega_W} = \frac{F_{\otimes}}{\Omega_K - F_{\otimes}} = \frac{S}{1-S} \quad (3)$$

при чему је Ω_W разлика између укупне површине пресека канала Ω_K и површине попречног пресека брода на главном ребру, F_{\otimes} .

4. *Фрудов број* у односу на дубину у пловном каналу, Fr_H [4], [6], [9] који се дефинише помоћу израза (3):

$$Fr_H = \frac{v}{\sqrt{g \cdot H_K}} \quad (3)$$

при чему су v – брзина кретања брода, а H_K – дубина пловног канала.

У даљем тексту излажу се различите методе којима могу да буду прорачунате величине додатног уроњаја бродова (ΔT) приликом кретања у условима пловног пута ограничене ширине и дубине, као и у пловним каналима.

4.1. Ноофт метода [4]

Додатни уроњај бродова по овој методи рачуна се према изразу 4:

$$\Delta T = (1,96 \div 2,03) \cdot \frac{V}{L_{kvl}^2} \cdot \frac{Fr_H^2}{\sqrt{1 - Fr_H^2}} \quad (4)$$

при чему су: V – истиснина брода; L_{kvl} – дужина брода на конструктивној водној линији.

4.2. Нууска-Гулиев метод [4]

Након бројних експеримената којима је Ноофт метода била база, Нууска је закључио да се, у условима кретања по пловном путу ограничених димензија и пловним каналима, бољи резултати постижу када се примени множилац 2,4, а истовремено уведе коректурни коэффициент K_S који се рачуна на основу израза: $K_S = 7,45 \cdot s_1 + 0,76$ уколико је $s_1 > 0,03$ и $K_S = 1,0$ за $s_1 \leq 0,03$, где је $s = \frac{S}{K_1}$. Додатни

уроњај бродова по Нууска-Гулиев методи рачуна се према изразу 5:

$$\Delta T = 2,4 \cdot \frac{V}{L_{kvl}^2} \cdot \frac{Fr_H^2}{\sqrt{1 - Fr_H^2}} \cdot K_S \quad (5)$$

Коефицијент K_1 приказан је у дијаграму у функцији величине S за различите односе резервне дубине испод брода (h_T) и ефективне дубине воде у каналу (h), што је приказано на слици 2.

Метода Нууска-Гулиев не препоручује се уколико је вредност Фрудовог броја већа од 0,7.

4.3. ICORELS метода [4]

ICORELS¹ метода настала је на основу Ноофт методе. Предлаже се за прорачун додатног уроњаја за конвенционалне типове бродова. Предложени израз разликује се од иницијалне вредности множиоца који се налази у границама 1,75 (за бродове са мањим коэффициентом пуноће истиснине δ) до 2,4 за бродове се најваћим вредностима коефицијента пуноће истиснине δ .

$$\Delta T = (1,7 \div 2,4) \cdot \frac{V}{L_{kvl}^2} \cdot \frac{Fr_H^2}{\sqrt{1 - Fr_H^2}} \quad (6)$$

Предложени израз је један од оних који препоручује PIANC² за прорачун додатног уроњаја бродова, али не препоручује се његово коришћење уколико је Фрудов број већи од 0,7.

4.4. Barras метода [4]

Barras-ова метода има једноставан израз за прорачун највеће вредности додатног уроњаја при кретању бродова у пловним путевима ограничене ширине и пловним каналима, израз 8:

$$\Delta T = \frac{\delta \cdot S_2^{2/3} \cdot v_k^{2,08}}{30} \quad (8)$$

Ова метода може да се примени под следећим условима: коэффициент пуноће истиснине бродског трупа треба да се налази у границама $0,5 < \delta < 0,9$; однос дубине према газу брода да се налази у границама $1,1 < H/T < 1,5$ и када је Фрудов број по дубини мањи од 0,7, тј. $Fr_H < 0,7$.

Уколико се при кретању бродова у ограниченим пловним путевима коэффициент S налази у границама $0,100 < S < 0,265$ тада се величина додатног уроњаја рачуна према изразу 9, при чему се максимални уроњај (ΔT) одређује у зависности од типа брода на основу вредности коефицијента пуноће истиснине δ и критичне брзине пловидбе v_k .

$$\Delta T = \frac{K \cdot \delta \cdot v_k^2}{100}, \text{ за } \delta > 0,7 \quad (9)$$

Вредност коректурног коефицијента (K) рачуна на основу израза: $K = 5,74 \cdot S^{0,76}$, при чему треба да буде испуњен услов $K \leq 2,0$.

¹ International Commission for the Reception of Large Ships

² Permanent International Association of Navigation Congresses

4.5. Eryzlu-Hausser metoda [4]

Eryzlu je vršio ispitivanja modela brodova pod sledećim uslovima: $\delta \geq 0,8$; $6,7 \leq L/B \leq 6,9$; $2,4 \leq B/T \leq 2,9$; $1,1 \leq H/T \leq 2,5$. Predloženi metod može da se примени при кретању бродова у пловним каналима, према изразу 10:

$$\Delta T = 0,298 \cdot \frac{H_K^2}{T} \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot T}} \right)^{2,289} \cdot \left(\frac{H_K}{T} \right)^{-2,297} \cdot K_b \quad (10)$$

Коректурни коефицијент према ширини канала, K_b , у овом изразу користи се под следећим условима:

$$K_b = \frac{3,1}{\sqrt{B_d/B}}, \text{ за } B_d/B < 9,61 \quad (10.1)$$

$$K_b = 1,0, \text{ за } B_d/B \geq 9,61 \quad (10.2)$$

где су B_d – ширина канала у дну, а B – ширина брода на конструктивној водној линији.

Ова метода препоручује се за оне бродове који се одликују већим вредностима коефицијента пуноће истиснине δ .

4.6. Norbin metoda [4]

Израз за прорачун величине додатног уроњаја бродова по овој методи има примену под условом да је $Fr_H < 0,4$ и има облик 11:

$$\Delta T = \frac{\delta}{15} \cdot \left(\frac{1}{L_{kvl}/B} \right) \cdot \left(\frac{1}{H/T} \right) \cdot v_k^2 \quad (11)$$

где је v_{kr} – критична брзина кретања бродова у каналу, m/s.

4.7. Römisch metoda [4], [10], [11]

После великог броја тестова са моделима бродова Römisch 1989. године развија своју методу и рачунски израз који има примену за све пловне путеве, код којих важи $1,19 \leq H/T \leq 2,25$.

Додатни уроњај брода рачуна се помоћу израза 12:

$$\Delta T = C_v \cdot C_F \cdot K_{\Delta T} \cdot T \quad (12)$$

при чему су C_v – коректурни коефицијент који узима у обзир брзину кретања брода; C_F – коректурни коефицијент који узима у обзир облик брода, док је $K_{\Delta T}$ – коректурни коефицијент који узима у обзир уроњај брода настао при критичним брзинама.

Изрази за прорачун наведених коефицијената представљени су у следећим облицима:

$$C_v = \left(\frac{v}{v_{kr}} \right)^2 \cdot \left(\frac{v}{v_{kr}} - 0,5 \right)^4 + 0,0625 \quad (12.1)$$

$$C_F = \left(\frac{10 \cdot \delta}{L_{kvl}/B} \right)^2 \quad (12.2)$$

$$K_{\Delta T} = 0,155 \cdot \sqrt{\frac{H}{T}} \quad (12.3)$$

Критична брзина v_{kr} зависи од типа пловног пута, тако да се за пловне канале рачуна према изразу $v_{kr} = c \cdot K_C$, при чему је c – брзина простирања таласа у односу на дубину каанала (H) док је K_C коректурни коефицијент критичне брзине за канал. Брзина простирања таласа у односу на дубину рачуна се из израза $c = \sqrt{g \cdot H}$, док се вредност коректурног коефицијента критичне брзине рачуна из израза

$$K_C = 0,2306 \cdot \log\left(\frac{1}{S}\right) + 0,0447$$

4.8. Metoda П. Н. Шанчурове [6], [8]

На основу резултата истраживања која је спровео Главни истраживачки институт водног транспорта (ГИИВТ-а) Руске федерације [8] следи израз П. Н. Шанчурове за прорачун додатног уроњаја брода ΔT – израз 13:

$$\Delta T = A \cdot T \cdot \frac{B_{kvl}}{B_K} \cdot Fr_H^3 \quad (13)$$

при чему је A – коректурни коефицијент, који код моторних бродова за превоз терета износи $A=6,4$, док је \bar{B} – средња ширина канала у поп-речном пресеку.

4.9. Metoda Г.И.Ваганова [6], [7]

На основу обраде података добијених током испитивања бродова у каналима од стране Научно истраживачког института водног транспорта (НИ-ИВТ-а) Руске федерације [6] следи израз Г. И. Ваганова за прорачун прираштаја величине газа брода, тј. додатног уроњаја брода:

$$\Delta T = 0,52 \cdot v^{2,7} \cdot \left(\frac{T}{H_K} \right)^{5/6} \quad (14)$$

док се за бродове који плове по каналима код којих је однос $\frac{\Omega_K}{F_{\otimes}} \geq 7$ додатни уроњај рачуна на основу израза 15:

$$\Delta T = 0,0075 \cdot v^{3,65} \cdot e^{40 \frac{F_{\otimes}}{\Omega_K}} \quad (15)$$

при чему је e – основа природног логаритма.

5. ПРИКАЗ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТАРА ПОТРЕБНИХ ЗА ПРОРАЧУН

У односу на изложене методе којима се утврђује додатни уроњај брода током пловидбе у каналу (ΔT) неопходно је претходно да се утврде стални параметри који су саставни делови ових метода. Прорачуни величине ΔT изведени су за највеће вредности газа, односно, за могуће величине газа оних бродова који поседују газ већи од дозвољеног за пловидбу по каналима система ДТД. У одабраним каналима усвојено је да је дубина воде константна и износи $H_K=3,0$ m док највећи дозвољени газ бродова не може да буде већи од $T=2,15$ m. Прорачун додатног уроњаја брода (ΔT) до којих долази током пловидбе у каналу изведен је за брзине $v=2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0$ и $12,0$ km/h. На основу одабраних брзина пловидбе бродова и константне дубине воде у каналима (H_K) рачунају се и одговарајуће вредности Фрудовог броја у односу на дубину – Fr_H .

Површина уроњеног дела брода на главном ребру (F_{\otimes}), рачуната је према изразу $F_{\otimes} = B_{kv} \cdot T_{\max} \cdot \beta$ [3] на основу података који су изложени у табели 1.

Обзиром да вредности коефицијента притиснутости воде у каналу од стране брода (S) и коефицијента повратне брзине (S_2) зависе од величине површина попречног пресека уроњеног дела брода на главном ребру (F_{\otimes}) и површине попречног пресека канала (Ω_K) вредност ових коефицијената утврђује се за сваку од комбинација $F_{\otimes} - \Omega_K$ бродова и канала.

6. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

6.1. Анализом израчунатих вредности динамичког уроњаја одабраних типова бродова по Ноофт и ICORELS методи уочава се блискост добијених резултата, што је за очекивати, будући да се рачунски изрази ових метода незнатно разликују један од другог. Ноофт метода не поставља посебне услове у поступку примене, док се ICORELS метода не препоручује за примену уколико је Фрудов број већи од 0,7, тј. $Fr \leq 0,7$, што у случају овог рада даје брзину пловидбе не већу од 3,366 m/s, односно, $v \leq 12,479$ km/h. Примена наведених рачунских метода показује да вредност додатног уроњаја бродова (ΔT) при кретању у каналима расте са порастом брзине пловидбе (v), што је приказано на случају ICORELS методе, слика 3.

6.2. Израз за прорачун додатног уроњаја бродова по Huuska-Guliev методи готово у потпуности је истоветан са Ноофт и ICORELS методама од којих се разликује по уведеном

коректурном коефицијенту K_s . Да би могао да се примени дијаграм (слика 2) неопходно је да се уведе и величина резервног размака између дна брода и дна пловног канала, h_T . На дијаграму (слика 2) конструисане су криве са односима h_T/h једнаким 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0. За потребе овог рада, у циљу коришћења овог дијаграма, за усвојене типове бродова и усвојену дубину воде у каналу израчунати однос износи $\frac{h_T}{h} = 0,18$ док је

за остале типове бродова $\frac{h_T}{h} = 0,14$. Како би се са

дијаграма очитале вредности коректурног коефицијента K_1 аутори су пажљивом интерполацијом конструисали криве са вредностима $h_T/h = 0,14$ и $h_T/h = 0,18$ па тек потом приступили поступку прорачуна величине додатног уроњаја.

6.3. Varras метода има једноставан израз за прорачун додатног (динамичког) уроњаја бродова али и више ограничења у односу на претходно описане методе. Тако, коефицијент пуноће истиснине треба да се налази у границама $0,5 < \delta < 0,9$; да се однос дубине према газу брода налази у границама $1,1 < H/T < 1,5$ и да је Фрудов број по дубини $Fr_H < 0,7$. Према усвојеним подацима за бродове (табела 1), следи:

(а) сви типови моторних бродова за превоз терета имају коефицијент пуноће истиснине мањи од тражене вредности $\delta < 0,9$; (б) односи дубине према газу бродова износи: $\left(\frac{H}{T}\right)_{MT700} = 1,219$ док овај

однос за остале типове бродова износи 1,162, чиме је испуњен захтев $1,1 < H/T < 1,5$; (в) највећа предвиђена брзина пловидбе бродова у каналима за све типове бродова износи $v=12,0$ km/h ($v=3,333$ m/s), тако да највећа вредност Фрудовог броја према дубини износи: $Fr_H=0,673$ чиме су испуњени сви услови за примену Varras методе.

Графички приказ израчунатих вредности додатног уроњаја по Varras методи за одабране типове бродова у функцији површине попречног пресека канала Ω_K приказан је на слици 4. Јасно се уочава тенденција смањења величине додатног уроњаја бродова са повећањем површине попречног пресека канала.

6.4. Eryzlu-Hausser метода поставља још више услова који треба да буду испуњени пре почетка прорачунавања величине додатног уроњаја, и то: $\delta \geq 0,8$; $6,7 \leq L/B \leq 6,9$; $2,4 \leq B/T \leq 2,9$; $1,1 \leq H/T \leq 2,5$. На основу постављених услова следи: (а) сви типови моторних бродова за превоз терета имају коефицијент пуноће истиснине већи од тражене вредности $\delta > 0,8$; (б) односи дужине бродова према њиховим ширинама износи:

$$\left(\frac{L}{B}\right)_{MT700} = 6,974; \left(\frac{L}{B}\right)_{MT850} = 8,211;$$

$$\left(\frac{L}{B}\right)_{MT1000} = 7,00; \left(\frac{L}{B}\right)_{MT1500} = 7,017 \quad u$$

$$\left(\frac{L}{B}\right)_{MT2600} = 6,956$$

Јасно се види да овај услов не може у потпуности да буде испуњен будући да се израчунате вредности односа L/B не налазе у границама од 6,7 до 6,9; (в) однос ширине према газу за одабране типове брода износе:

$$\left(\frac{B}{T}\right)_{MT700} = 4,2; \left(\frac{B}{T}\right)_{MT850} = 3,944;$$

$$\left(\frac{B}{T}\right)_{MT1000} = 4,909; \left(\frac{B}{T}\right)_{MT1500} = 4,56 \quad u$$

$$\left(\frac{B}{T}\right)_{MT2600} = 4,380$$

тако да ниједан од усвојених типова бродова не испуњава овај постављени услов; (г) одабрани типови бродова у потпуности испуњавају услов $1,1 \leq H/T \leq 2,5$. Ова метода за прорачун величине додатног уроњаја бродова у каналима успостављена је на основу моделских испитивања бродова у посебним истраживачким базенима.

Дакле, од четири постављена услова испуњена су два, и то по коефицијенту пуноће истиснине δ и по односу H_K/T . Аутори су се сагласили да се условно може прихватити да је испуњен и услов по односу L/B будући да нису велике разлике у односу на највећу тражену вредност, док једино услов по B/T нити за један од типова бродова не одговара траженим вредностима.

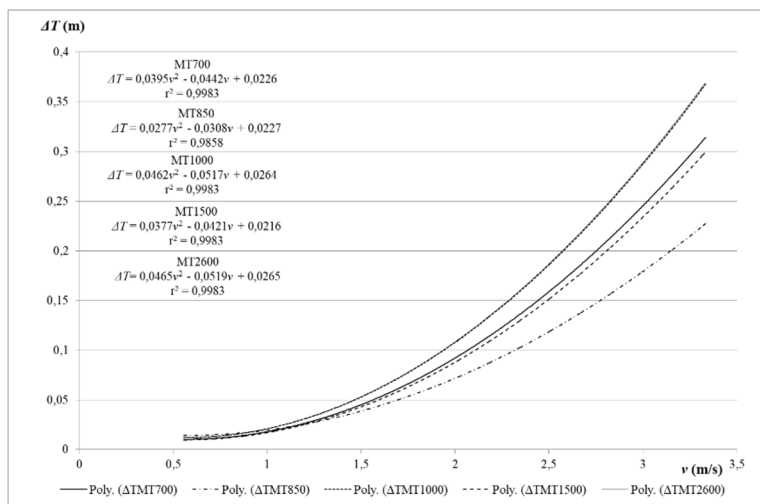
6.5. Norbin-ова метода поставља само један услов, и то да је $Fr_H < 0,4$. Решавањем неједначине $\frac{v}{\sqrt{g \cdot H_K}} < 0,4$, за константну дубину воде у каналима $H_K=3,0$ m, следи да метода има смисла и може да се примени за брзине пловидбе $v < 2,1699$ m/s, односно $v < 7,8119$ km/h.

6.6. Römisch метода прорачуна додатног уроњаја бродова (заснована на испитивањима модела бродова) при кретању у каналима једна је од најзахтевнијих метода по обиму посла, и у почетној фази, поставља један услов, и то: $1,19 \leq h/T \leq 2,25$. Будући да одабрани типови бродова испуњавају постављени услов метода може да буде примењена.

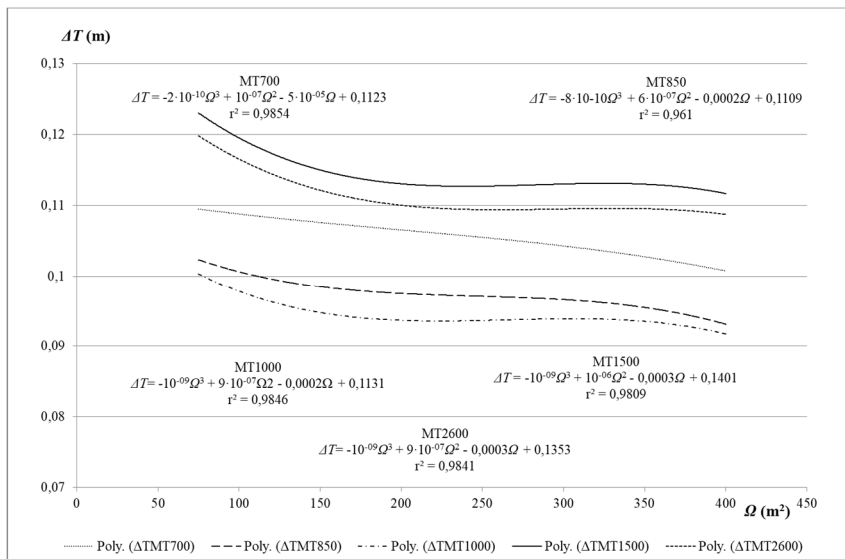
Метода се заснива на познавању површине попречног пресека канала Ω_K и површине уроњеног дела брода на главном ребру F_{\otimes} на основу којих се одређују критичне брзине кретања бродова v_{kr} по појединим каналским правцима [10], [11], [12].

6.7. Метода П. Н. Шанчурове, такође, користи податак о попречном пресеку канала али не по површини попречног пресека већ по средњој ширини канала у попречном пресеку, \bar{B} . Будући да средња ширина \bar{B} зависи од површине попречног пресека канала то се израчунате вредности додатног уроњаја ΔT приказују у функцији брзине пловидбе v и површине попречног пресека Ω_K .

6.8. Метода Г. И. Ваганова разликује се од осталих метода по томе што се прорачун додатног уроњаја бродова врши у функцији величине односа Ω_K/F_{\otimes} , и то уколико је однос $\Omega_K/F_{\otimes} \geq 7,0$ прорачун се одвија по изразу 15, а уколико је $\Omega_K/F_{\otimes} < 7,0$ тада се поступак прорачуна одвија по изразу 14.



Слика 3 - Промена динамичког уроњаја бродова у функцији брзине пловидбе по ICORELS методи, $\Delta T=f(v)$

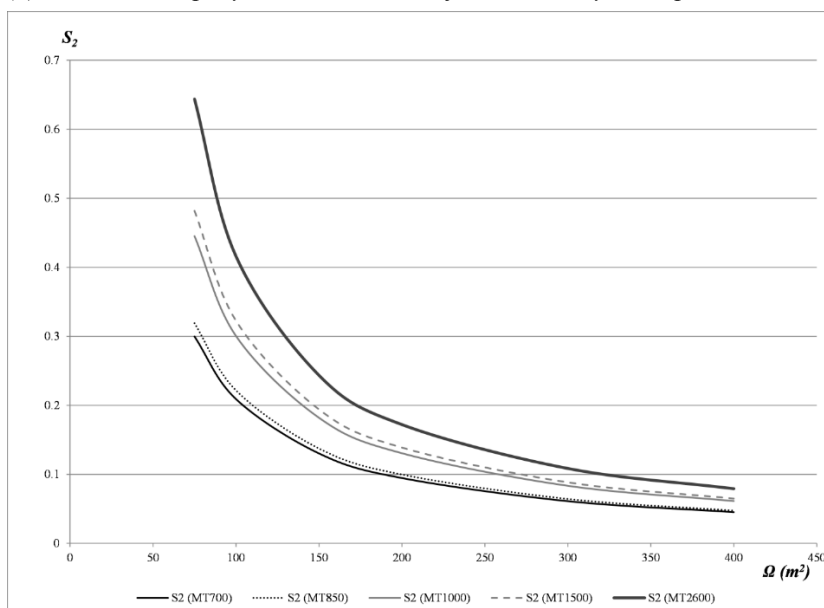


Слика 4 - График промене додатног уронјаја бродова у функцији попречног пресека канала по Barras методи, $\Delta T=f(\Omega_K)$

Табела 2. Израчунате вредности додатног уронјаја бродова (ΔT у m) за $\Omega_K \approx 150 \text{ m}^2$, $H_K \approx 3,0 \text{ m}$ и $v = 8,0 \text{ km/h}$

Метода	ΔT_{MT700}	ΔT_{MT850}	ΔT_{MT1000}	ΔT_{MT1500}	ΔT_{MT2600}
Hooft	0,1146	0,0995	0,1160	0,1189	0,1253
Huuska-Guliev	0,1094	0,1008	0,0963	0,1168	0,1146
ICORELS	0,1194	0,0910	0,1396	0,1141	0,1407
Barras	0,1063	0,0917	0,0999	0,1142	0,1071
Eryzlu-Hausser(*)	0,2625	0,2623	0,2927	0,3042	0,3348
Norbin	0,0329	0,0287	0,0350	0,0339	0,0349
Römisch(*)	0,0521	0,0373	0,0565	0,0532	0,0555
П.Н.Шанчурова	0,1700	0,1756	0,2237	0,2361	0,2858
Г.И.Ваганов	0,1695	0,1742	0,3959	0,4035	0,4112

Напомена: ознака (*) односи се на рачунске методе добијене на основу експеримента са моделима бродова



Слика 5 - Дијаграм промене коефицијента утицаја повратне брзине воде S_2 у функцији површине попречног пресека канала Ω_K , $S_2(\Omega_K)$

Утицај ширине канала (B_B) и коефицијента повратне брзине (S_2) несумњиво имају свог одраза на величину додатног уроњаја бродова. Тако, на пример, ширине канала у дну (B_d) треба да су веће (или бар једнаке) од утицајне ширине канала, при чему утицајне ширине по појединим бродовима имају вредности: $B_{B(MT700)}=70,068$ m; $B_{B(MT850)}=70,197$ m; $B_{B(MT1000)}=86,810$ m; $B_{B(MT1500)}=93,187$ m; $B_{B(MT2600)}=111,904$ m. Када се анализирају подаци који се односе на каналску мрежу ДТД [2] види се да ниједан од каналских праваца не одговара постављеном услову $B_d > B_B$.

Утицај брзине воде (S_2) која се креће у смеру који је супротан смеру кретања брода има, такође, великог утицаја на величину додатног уроњаја брода. Из дијаграма, (слика 5) јасно се уочава интензитет утицаја односа F_{∞} / Ω_K на вредност коефицијента S_2 . Евидентно је да са порастом површине попречног пресека канала (Ω_K) утицај повратне брзине врло брзо опада, и обрнуто, са смањењем површине пресека канала тај утицај се значајно увећава. Тако, на пример, за брод МТ700 ови коефицијенти за најмањи и највећи пресек износе: $S_{2(\Omega_K=75)}=0,2997$, док је $S_{2(\Omega_K=400)}=0,0452$, при чему је $S_{2(\Omega_K=75)} / S_{2(\Omega_K=400)}=6,63$. Код већих бродова овај однос је много већи, на пример, за брод МТ2600 износи 8,12. Величину утицаја ова два чиниоца - ширина канала и брзина повратне воде - потребно је посебним истраживањима утврдити и објаснити.

На крају, у табели 2, приказују се израчунате вредности додатног уроњаја бродова усвојених типова према изложеним методама и поступцима. Због великог броја израчунатих података који се односе на кретање бродова у различитим условима (функције $\Delta T=f(v)$ и $\Delta T=f(\Omega_K)$) аутори су се определили да изложе само резултате који се односе на пловидбу бродова у каналу на правцу Нови Сад-Савино Село ($\Omega_K \approx 150$ m²), при чему је средња дубина воде у каналу $H_K \approx 3,0$ m, а брзина пловидбе од $v=8,0$ km/h.

7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

У претходним поглављима аутори су приказали девет различитих поступака за прорачун величине додатног (динамичког) уроњаја бродова одабраних типова наших бродарских компанија приликом кретања по каналима из система ДТД при различитим брзинама пловидбе. На основу спроведених прорачуна (водећи, при том, рачуна о свим ограничењима које методе захтевају) види се, да величина додатног (динамичког) уроњаја бродова ΔT опада са порастом површине попречног пресека канала (Ω_K), односно са смањењем брзине њиховог

кретања (v), и обрнуто, ова величина расте уколико се смањењује површина попречног пресека канала или расте брзина пловидбе. Како би се оценила применљивост описаних метода прорачуна потребно је да се паралелно прикажу вредности додатног уроњаја бродова у неком од одабраних случајева пловидбе. У том циљу аутори су одабрани да прикажу резултате прорачуна који се односе на брод типа МТ700 при кретању по правцу канала Н.Сад-С.Село чија површина попречног пресека износи $\Omega_K \approx 150$ m² и при брзини пловидбе $v=8,0$ km/h. Очигледно је, да прве четири методе (Hoof, Huska-Guliev, ICORELS, Barras) дају готово идентичне резултате, при чему се они сасвим незнатно разликују један од другог.

Када се разматра Eryzlu-Hausser метода важно је истаћи да одабрани типови бродова нису испунили услове које поставља метода - од четири постављена услова испуњена су два, по коефицијенту пуноће истиснине δ и по односу H_K/T ; условно је прихваћено да је испуњен услов по односу L/B , док једино услов по V/T нити за један од типова бродова не одговара траженим вредностима. Из тог разлога потребно је ову методу усвојити са одређеном резервом.

Код Romisch методе прецизност рачунања додатног уроњаја зависи од тачности одређивања критичне брзине пловидбе бродова (v_{kr}) и поузданог познавања површине попречног пресека пловног канала Ω_K . Уочљиво је да Romisch метода даје изразито мале вредности динамичког уроњаја бродова ΔT . Треба нагласити да су Eryzlu-Hausser и Romisch метода настале на основу експеримената са моделима бродова у истраживачким базенима, при чему се израчунате вредности додатног уроњаја разликују у великој мери.

Norbin метода, како се из табеле 2 види, даје изразито најмање вредности додатног уроњаја бродова - што, такође, треба усвојити са резервом.

Како би се применила метода П. Н. Шанчурове неопходно је тачно познавање средње ширине канала у попречном профилу, \bar{B} . Будући да аутори нису имали на располагању прецизну вредност величине \bar{B} , тада су на основу усвојене површине попречног пресека $\Omega_K=150$ m², а полазећи од претпоставке да је канал облика трапеза, приступили прорачуну средње ширине \bar{B} . Код методе Г. И. Ваганова јасно се уочава разлика у израчунатој вредности додатног уроњаја брода када се примењује однос $\Omega_K/F_{\sigma} \geq 7$ односно $\Omega_K/F_{\sigma} < 7$. Код бродова серије МТ700 и МТ850 величина уроњаја је готово идентична, док се код осталих типова бродова додатни уроњај значајно разликује. Оно што

даје извесну предност при примени метода П. Н. Шанчурове и Г. И. Ваганова над осталим методама је чињеница да су настале на основу обављених експеримената са реалним бродовима у реалним условима (пловним каналима) у реалном времену. Како је то у уводу изложено појаву динамичког уроњаја бродова прате два посебна случаја, као што су: (а) почетак преливања палубе и (б) момент контакта пропульзивно-крмиларског комплекса бродова са дном канала. Будући да је све ово везано за сигурност пловидбе неопходно је, да се посебним истраживањима, утврди она критична брзина кретања бродова како се не би догодили како преливање палубе, тако и контакт са дном канала. На крају, необично је важно да се приступи систематским испитивањима пловидбе постојећих бродова на главним правцима из система канала ДТД при различитим дубинама и различитим брзинама пловидбе што ће допринети не само код утврђивања критичне брзине пловидбе, већ и показати која од различитих метода може да има најбољу примену.

8. ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад настао је у оквиру пројекта „Савремени трендови и иновације у развоју курикулума у области саобраћаја и транспорта“, који реализује Департман за саобраћај Факултета техничких наука, Универзитет у Новом Саду.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Студија техноекономских карактеристика постојећих моторних теретњака*, Факултет техничких наука, Институт за хидраулику и саобраћај, Универзитет у Новом Саду, 1991;
- [2] *Оптимизација техно-економских параметара рених бродова-моторних теретњака*, Научно-образовни институт за хидраулику и саобраћај, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, 1990
- [3] Крецуљ С. Добрен, Чолић С. Владета, *Пловност брода*, Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, 1991
- [4] Vukić M, Comparative analysis of methods for calculating the ship's squat, *7th International Conference on Ports and Waterways – POWA, Zagreb 2012*
- [5] Vukić M. Influence of ships breadth on selecting fairway, *7th International Conference on Ports and Waterways – POWA, Zagreb 2012*
- [6] Ваганов Г. И, Воронин В. Ф, Шанчурова В. К, Тяга судов, *Транспорт*, Москва, 1986;
- [7] В. Н. Анфимов, Г. И. Ваганов, В. Г. Павленко, Судовые тяговые расчеты, *Транспорт*, Москва, 1978
- [8] Головников В. И, Суколенов А. Е, Шанчурова В. К. Основы организации работы флота и портов, *Транспорт*, Москва, 1976
- [9] В. Н. Анфимов, Г. Н. Сиротина, А. М. Чижов, Устройство и гидромеханика судна, *Судостроение*, Ленинград, 1974
- [10] 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
- [11] И. Шкиљаица, В. Шкиљаица, Утицај површине попречног пресека канала на критичну брзину пловидбе, *Техника*, број 5, Савез инжењера и техничара Србије, Београд 2020
- [12] И. Шкиљаица, В. Шкиљаица, М. Живковић, Методе одређивања брзине струјања воде у каналима у циљу заштите косина и дна канала од рушења, *Техника*, број 5, Савез инжењера и техничара Србије, Београд, 2021.

SUMMARY

ADDITIONAL SQUAT OF INLAND VESSELS DURING NAVIGATION IN NAVIGABLE CHANNELS – CALCULATION PROCEDURES

In the paper, the conditions of movement of displacement-type cargo ships of our shipping companies along waterways were analyzed in order to determine the occurrence of an additional increase in draft of ships, the so-called. additional or dynamic immersion of the ship – ship's squat. The methods applied in the work were the result of foreign research conducted with ships in real navigating conditions as well as special basins, then published in the literature in English and Russian. The author's goal was to, based on the methods published in the paper, examine the phenomenon of additional sinking of ships and determine the influence of ship movement on this phenomenon as a new step in the preparations for searching for the optimal regime of navigation of ships along these navigable channels. Self-propelled ships for the transport of various types of cargo in channels of variable cross-sectional area and at different navigating speeds were subjected to calculations.

Key Words: *additional draft-squat, navigating speed, navigable channel, displacement type ship, increase in draft*