

Modelovanie hydraulických parametrov prúdenia pre posúdenie plavebných podmienok. Aplikácia na vybranom vodnom diele

Andrea Palkovičová¹

Anotácia

Príspevok sa zaoberá rozborom vplyvu prevádzky objektov vodných diel na plavbu. Na viacúčelových vodných dielach niektoré dynamické funkcie vodnej elektrárne môžu ohroziť bezpečnosť plavby. Preto je dôležité vedieť kvalifikovať a kvantifikovať jednotlivé vplyvy prevádzky na ostatné funkcie vodného diela (VD) a následne prevádzku VD optimalizovať. Vhodným nástrojom pre výskum a overenie nautických podmienok sú najmä simulácie na matematických modeloch či fyzikálnych modeloch vhodnej mierky v laboratóriu.

Kľúčové slová

Vodné cesty, matematické modelovanie, plavebné komory, Vodné dielo Gabčíkovo, Dunaj

Annotation

The article deals with analysis of the impact in operation mode of some water structures on the navigation. At the multipurpose water structures, some dynamic functions of a hydroelectric powerplant can endanger the safety of navigation. Therefore, it is important to know how to qualify and quantify the individual effects of the operation mode in the other functions of the water structure and then optimize the operation mode. A suitable tool for research and verification of the nautical conditions is particularly a simulation of a mathematical model or a physical model of an appropriate scale in the laboratory.

Key words

Waterways, mathematical modelling, locks, Hydraulic Structure Gabcikovo, Danube

Úvod

Vodné diela na splavných tokoch zlepšujú parametre plavebnej dráhy na vyššej úrovni ako úpravy zásahmi regulačného typu. Vzduť hladiny zväčšujú plavebné hĺbky, ktoré sú kľúčový parameter plavebnej dráhy, vo väčšine prípadov aj šírku plavebnej dráhy a polomery oblúkov. Dôsledkom lepších parametrov plavebnej dráhy je zvýšenie dopravnej kapacity vodnej cesty. Na viacúčelových VD, ktorých súčasťou je viac funkčných objektov ako plavebná komora, vodná elektráreň či vzdúvací objekt - hať, dochádza prevádzkou týchto objektov k ovplyvňovaniu prúdenia a prostredníctvom silového pôsobenia prúdiacej vody k ovplyvňovaniu trasy pohybu plavidla. Optimálny a bezpečný pohyb plavidla po prúdiacej

¹ Ing. Andrea Palkovičová, Katedra hydrotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, e-mail: andrea.palkovicova@stuba.sk

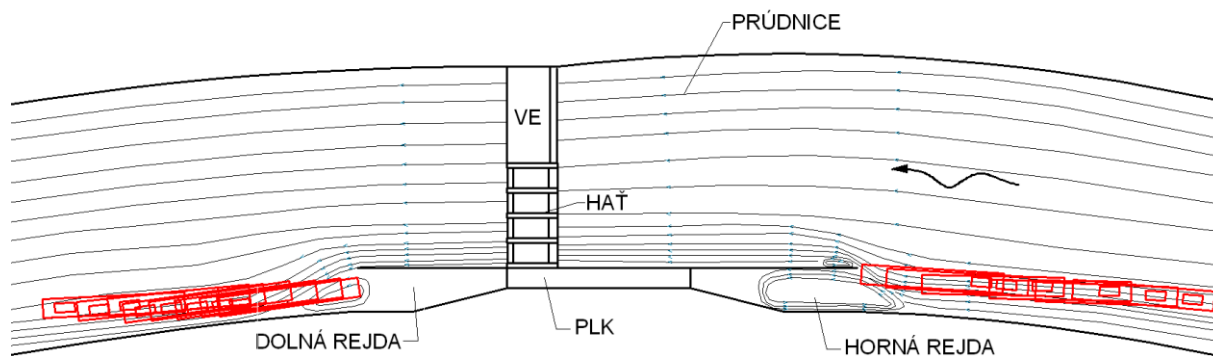
vode ako aj jeho manévrovanie a ovládateľnosť súvisia s veľkosťou zmeny prietokového množstva prevádzkami na vodnom diele – hati či vodnej elektrárni, časovým priebehom prevádzky, sklonom hladiny a smerom pohybujúceho sa plavidla v kanáli. Dôsledkom nepriaznivého vplyvu prúdenia na plavidlo môže byť kolízia s iným plavidlom, náraz na funkčný objekt vodného diela, náraz na breh vodnej cesty prípadne odtrhnutie vyviazaného plavidla.

V súčasnosti sa k výskumu a overeniu nautických podmienok na splavnených tokoch využíva fyzikálne i matematické modelovanie. Pre finančnú a časovú náročnosť výskumu na laboratórnom hydraulickom modeli, sú častejšie vyhľadávané metódy matematického modelovania. Matematický model predstavuje idealizáciu skutočného fyzického systému vo forme matematických výrazov v inžinierskej praxi najčastejšie vyjadrené vo forme parciálnych diferenciálnych rovníc. Pomocou simulácií môžeme skúmať reakcie daného matematického modelu na zmeny vstupných dát a korigovať tak prevádzkové parametre už existujúcich objektov vodných diel.

Komplikovanosť pohybu plavidiel v dotknutom úseku

K výraznému ovplyvňovaniu plavebnej prevádzky energetickou prevádzkou dochádza najmä pri derivačných schémach. Ovplyvňovanie plavby spôsobujú najmä regulačné vodné elektrárne využívané na krytie zaťaženia elektrizačnej sústavy. V týchto prípadoch je potrebné výskumom určiť medzu prípustnej manipulácie s vodnou elektrárnou alebo navrhnúť opatrenia, ktoré umožnia zladit' záujmy plavby a energetiky ([2]).

Najkritickejší priestor na vodných cestách (VC) z hľadiska možného ohrozenia bezpečnosti plavebnej prevádzky a obmedzenia dopravnej kapacity je úsek prechodu z voľnej trate VC do priestoru plavebnej komory (PLK). V tomto úseku je značne obmedzená práve plavebná šírka. Na krátkom úseku sa plavebná šírka voľnej trate zúži na šírku PLK. Plavidlo musí znížiť svoju rýchlosť, ktorou pláva na voľnej trati tak, aby bolo schopné spomaliť svoj pohyb pri vplávaní do PLK prípadne úplne zastaviť, ak sa z akýchkoľvek dôvodov nedá do PLK vplávať. Zároveň nesmie rýchlosť vplávania podkročiť hodnoty minimálnej manévrovacej rýchlosti. Keď plavidlo znižuje svoju rýchlosť a stáva sa tak menej ovládateľným, sa najvýraznejšie prejavujú silové účinky rýchlostného poľa prúdenia vody. Rozhodujúci je najmä vplyv priečných zložiek prúdenia, ktoré pôsobia priečne na smer pohybu plavidla. Prúd vytláča plavidlo z ideálnej plavebnej trasy, čím vzniká nebezpečenstvo už spomínaných kolízií (Obr. 1).



Obr. 1 Schéma plavebného stupňa s možnou trajektóriou pohybu plavidla

Minimalizovať opísané komplikácie pri pohybe plavidiel medzi voľnou traťou a PLK a negatívnej vplyvy pôsobiace na bezpečnosť plavby majú rejdy PLK. Ich primárna úloha je vytvoriť podmienky na plynulý a bezpečný prechod plavidiel z voľnej trate VC do obmedzeného priestoru PLK a opačným smerom. Ďalšou nemenej dôležitou úlohou rejdu je vytvoriť chránený priestor na vyčkávanie plavidiel v prípade, že je PLK obsadená, prípadne plniť funkciu ochranného či havarijného prístaviska.

Modelovanie parametrov prúdenia na VDG

Pre súčasný stav medzinárodnej vodnej cesty Dunaj je dôležité, aby aj krátky úsek tejto rieky prechádzajúci Slovenskom zaistil dostatočnú plavebnú bezpečnosť a dopravnú kapacitu. Mala by byť preskúmaná oblasť vplyvu prevádzky VEG na bezpečnosť plavby na dotknutom úseku Dunaja (Obr. 2). Prevádzka vodnej elektrárne, do vybudovania dolného stupňa Sústavy vodných diel Gabčíkovo – Nagymaros, je v priebežnej prevádzke s hladinovou reguláciou. Priebežná prevádzka elektrárne predstavuje rovnomerné spracovanie prietokov, ktoré určuje Hydroenergetický dispečing Trenčín počas 24 hodín podľa prietokových prognóz. Regulačná prevádzka sa vykonáva v zmysle „Podmienok regulačnej prevádzky“ a predstavuje využívanie zásobného objemu Zdrže Hrušov a prírodného kanála pri zmenách prietokov Dunaja.



Obr. 2 Vodné dielo Gabčíkovo

Matematické modelovanie poskytuje vhodné nástroje na simulovanie prúdových pomerov prevádzkového režimu VDG. Ako matematický model som si zvolila voľne šíriteľný softvér River 2D, ktorý bol vyvinutý na Univerzite v Alberte v roku 2002 a používa metódu konečných prvkov. Tento program je vhodný najmä pre prírodné toky a umožňuje, okrem modelovania hydraulických javov aj zahrnutie rybieho habitátu či ľadochodu. Bol verifikovaný prostredníctvom sérií porovnaní s teoretickými, experimentálnymi a terénnymi výsledkami (Ghane mel al, 1995a; Waddle et al, 1996, Christison et al). River 2D je dvojdimenzionálny modelovací systém pre modelovanie prúdenia vody s voľnou hladinou a umožňuje podrobne riešiť ustálené a neustálené dvojrozmerné turbulentné prúdenia vody v oblastiach so zložitou geometriou. Teoretický základ poskytujú tri rovnice, ktoré vychádzajú z fyzikálnych zákonov – zákon zachovania hmotnosti a zákon zachovania hybnosti a sú vyjadrené vo forme parciálnych diferenciálnych rovníc plytkej vody v tvare: rovnica zachovania hmotnosti:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

rovnica hybnosti v smere osi x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 \\ = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right) \end{aligned}$$

a rovnica hybnosti v smere osi y:

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2$$

$$= gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \right)$$

kde: H – hĺbka vody,

U, V – priemerné rýchlosti vody v smere súradnicových osí x a y,

q_x, q_y – príslušný prítok v smere súradnicových osí x a y,

g – konštanta gravitačného zrýchlenia,

ρ - hustota vody,

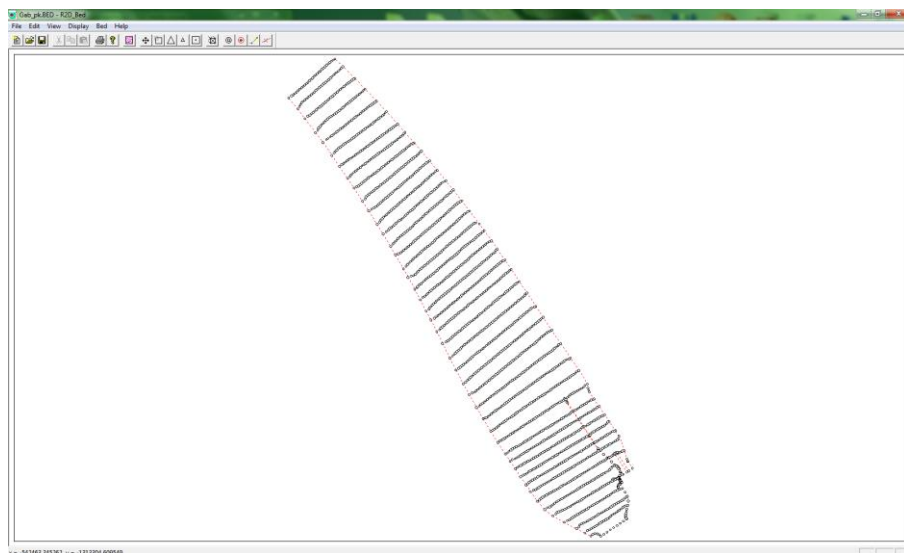
S_{0x}, S_{0y} – sklon dna koryta,

S_{fx}, S_{fy} – sklon čiary energie,

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ – zložky turbulentného napätia.

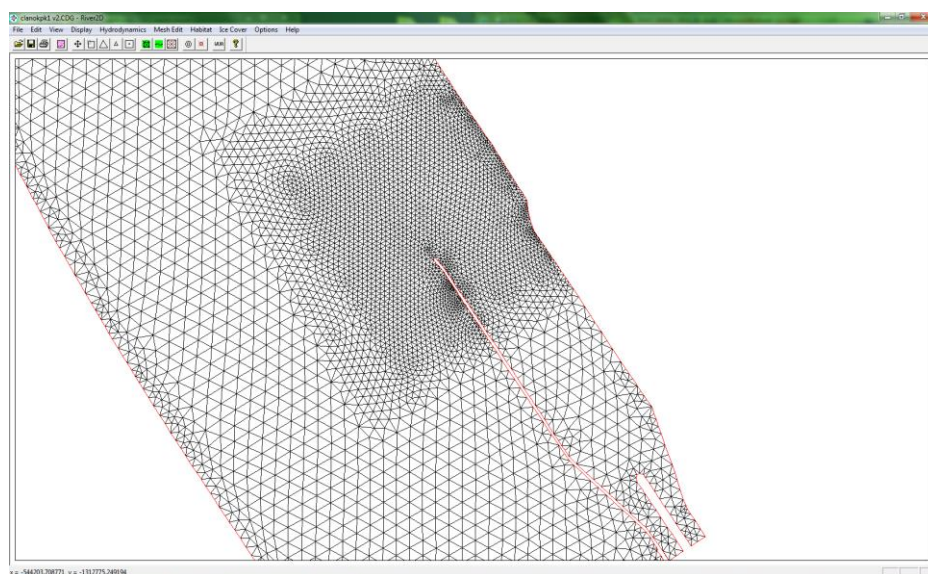
Metodika matematického modelovania

Softvér River 2D pozostáva zo 4 submodulov a to R2D_Bed - vstupná topografia, R2D_Mesh - vygenerovanie výpočtovej mriežky, R2D_Ice a River2D - simulácia podľa zadáných okrajových a počiatočných podmienok. Oblasť skúmaná týmto softvérom predstavuje asi trojkilometrový úsek prírodného kanála tesne nad VEG a približne dvojkilometrový úsek odpadného kanála tesne pod VEG. Podkladmi pre tvorbu matematického modelu bolo geometrické usporiadanie koryta v priečnom a pozdĺžnom smere, popísané súradnicami bodov (x, y, z) a namerané hodnoty prietoku a hladiny pre príslušný prietok, ktoré tvorili okrajové podmienky modelu. Prvý krok predstavuje vytvorenie geometrie pomocou súboru bodov, ktorý charakterizuje približne dvojkilometrový úsek koryta Dunaja pod VEG. Následne je súbor upravený tak, aby sa dal importovať do submodulu R2D_Bed, čiže body sa očísľujú a je im zadaný súčiniteľ drsnosti. Následne je zadaná vonkajšia hranica riešenej oblasti (červená) (Obr. 3).



Obr. 3 Geometria koryta nad VEG s vyznačením vonkajšej hranice riešenej oblasti

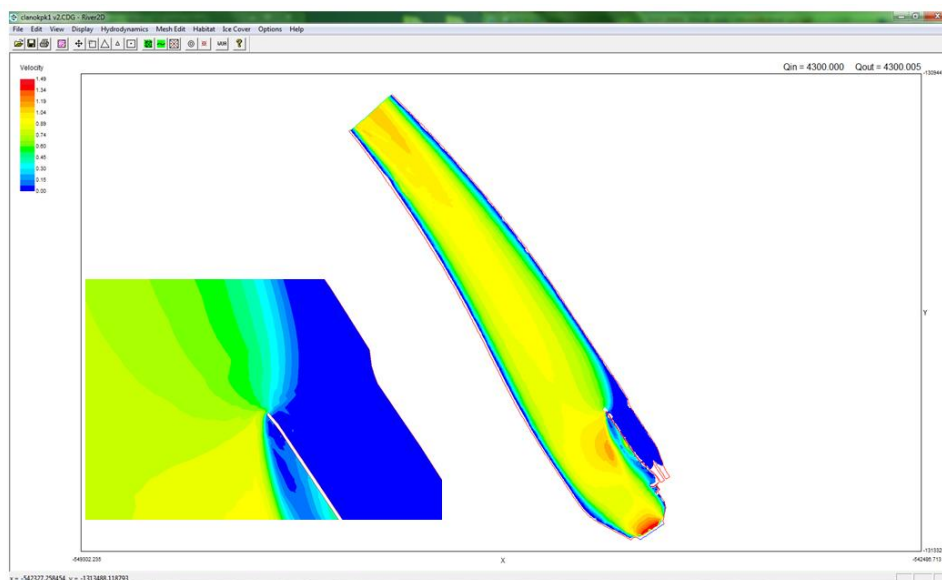
Takto pripravený súbor z R2D_Bed sa následne otvorí v modeli R2D_Mesh, kde sa zadajú okrajové podmienky na vtoku a výtoku a to prietok na hornom okraji a nadmorská výška hladiny vody zodpovedajúca danému prietoku na dolnom okraji. Potom sa vytvorí trojuholníková výpočtová sieť – grid (Obr. 4) na základe zadaných bodov na hranici modelovanej oblasti s hustotou vyhovujúcou Quality indexu.



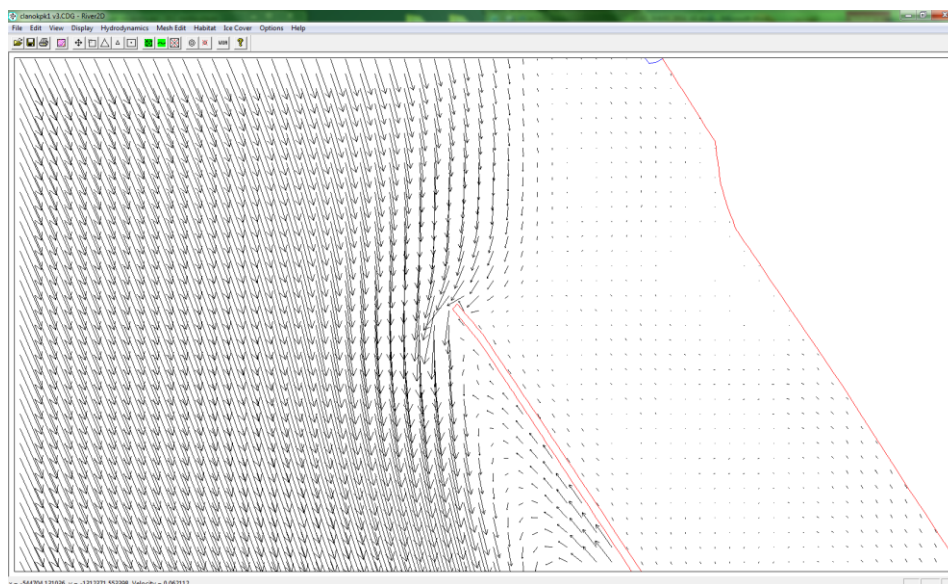
Obr. 4 Vygenerovaná výpočtová sieť v koryte nad VEG, zahustená v okolí rejdy

Následne je potrebné vytvoriť súbor, ktorý tvorí vstup do simulačného modulu River2D. Po otvorení tohto súboru v modeli River2D sa vyberie mód ustáleného alebo neustáleného prúdenia a spustí sa výpočet. Najdôležitejším výstupom matematického modelu pri simulovaní zložitého priestorového prúdenia v oblasti vodných diel s plavebnou prevádzkou je rýchlostné pole prúdenia. Pri prúdení v skúmanej oblasti vznikajú zložité prúdové pomery, ktoré je na fyzikálnom moli veľmi zložitý zmerať – smer vektora rýchlosti sa dá len odhadovať. Výsledky simulácií z matematického modelu sa dajú zobrazit' obrysami, farebnou škálou alebo ako vektory. Spresnenie výsledkov sa dá doceliť lokálnym

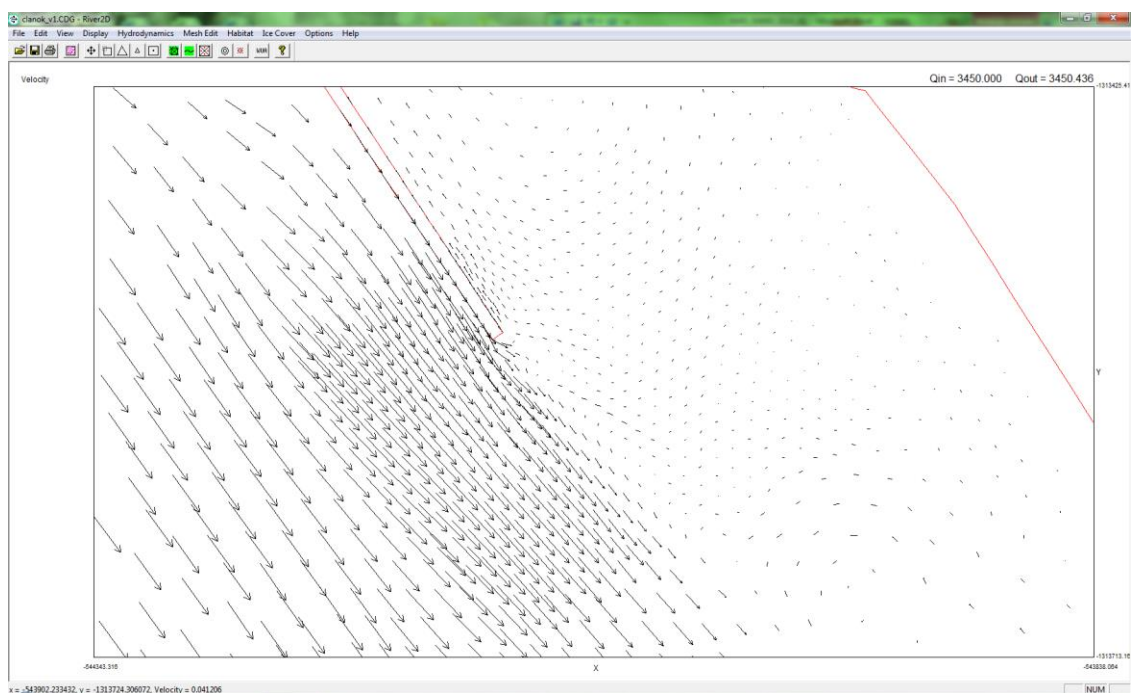
zahustením gridu, čo však výrazne predlžuje výpočtový čas. **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** znázorňuje rýchlosti prúdenia modelovanej oblasti nad VEG pri prietoku $3400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ s detailom vtoku do hornej rejdy. Simulácia prúdenia je vykonaná v podmienkach neperforovanej deliacej steny v hornej rejde. Výsledné vektorové pole prúdenia je zobrazené na Obr. 6. Výsledné vektorové pole prúdenia modelovanej oblasti pod VEG pri prietoku $3400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ predstavuje Obr. 7 a pri zníženom prietoku $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ predstavuje Obr. 8.



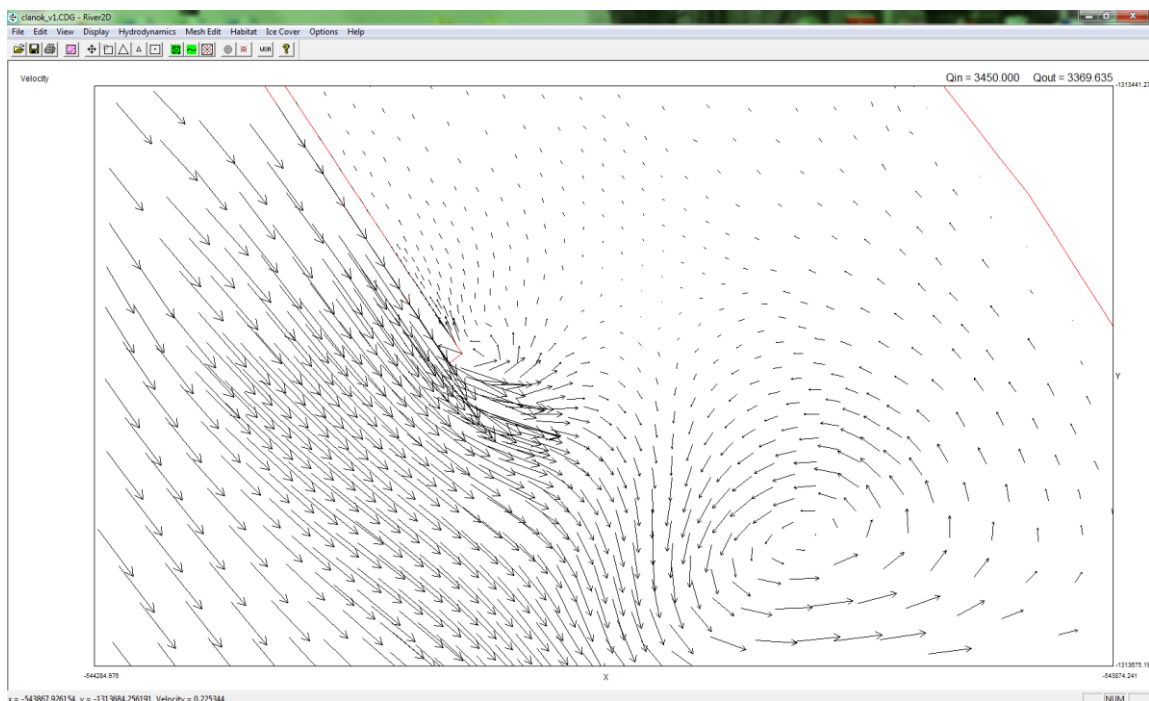
Obr. 5 Rýchlosti prúdenia zobrazené farebnou škálou



Obr. 6 Vektorové pole prúdenia, vtok do hornej rejdy



Obr. 7 Zobrazenie rýchlostí prúdenia vektormi pri prietoku 3400, vtok do dolnej rejdy



Obr. 8 Zobrazenie rýchlostí prúdenia vektormi pri prietoku 800, vtok do dolnej rejdy

Záver

Prevádzkou hydrotechnických objektov na vodných stavbách dochádza k ovplyvneniu plavebných podmienok. Bezpečný pohyb plavidiel na vodnej ceste – ich schopnosť manévrovať, súvisí so smerom, orientáciou a veľkosťou vektorov rýchlostí prúdenia, sklonom hladiny a časovým priebehom týchto parametrov. Skúsenosti z plavebnej prevádzky

poukazujú na skutočnosť, že vplyv prúdenia na trajektóriu pohybu plavidla sa prejavuje najmä v bezprostrednej blízkosti plavebnej komory a jej rejd. V tomto úseku sa výrazne zužuje plavebná šírka a plavidlo znižuje svoju rýchlosť, aby bolo schopné vplávať do PLK. Najmä poprúčne plavidlá sú pri znižovaní rýchlosti viac ohrozené stratou manévrovateľnosti a hrozí im kolízia s iným plavidlom, náraz na breh vodnej cesty či niektorý funkčný objekt vodného diela napr. rejd PLK. Najmä na stavbách väčších rozmerov, členitejších alebo viacúčelových je vhodné simulovať prevádzku na matematických a fyzikálnych modeloch. Zostrojením matematického modelu a samotnými simuláciami pri rôznych prietokových režimoch elektrárne sa zistia parametre rýchlostného poľa prúdenia v blízkosti rejd PLK. Na základe vyhodnotenia vplyvu prevádzky objektov VD na bezpečnosť plavby je možné formulovať opatrenia, ktoré negatívne vplyvy minimalizujú alebo dokonca eliminujú a teda nájsť optimálne parametre prevádzky vodnej elektrárne, aby neboli narušené dynamické funkcie tejto elektrárne v energetickej sústave a zároveň nebola obmedzená plavebná bezpečnosť plavidiel regulačnou prevádzkou elektrárne.

Literatúra

BLACKBURN, J., STEFFLER, P.: River2D, Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat, River2D Tutorial – The Basics, University of Alberta, 2002.

KUTIŠ, V.: Základy modelovania a simulácií. Katedra mechaniky, STU v Bratislave FEI, 2006.

Dočasný manipulačný poriadok pre SVD G-N na území SR. Bratislava, 2010, aktualizácia VIII.

MOŽIEŠIK, Ľ.: Interakcia prevádzky vodných diel a plavby, edícia vedeckých prác, zošit č.14, STU v Bratislave SvF, Bratislava, 2003.

PALKOVIČOVÁ, A.: Vplyv havarijného odstavenia Vodnej elektrárne Gabčíkovo na hladinový a prietokový režim Dunaja s ohľadom na plavbu, diplomová práca, STU v Bratislave SvF, 2012.

PALKOVIČOVÁ, A.: Výskum v programe rozvoja vodných ciest na Slovensku, 12. Konferencia mladých vodohospodárov, SHMU Bratislava, 2012.

PALKOVIČOVÁ, A., KVĚTON, R., MOŽIEŠIK, Ľ.: Mathematical Modelling of Extreme Changes in Flow Mode to the Waterwork Gabčíkovo, 13th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Bratislava Slovakia 2013.

MOŽIEŠIK, Ľ.: Vodohospodársky model prevádzky VD Gabčíkovo. Bratislava, STU v Bratislave SvF, 2008.

MOŽIEŠIK, Ľ., ČEPCOVÁ, Z.: Konfliktne situácie pri prevádzke na vodných dielach. Projekt ESF hydroinformatika, Bratislava 2009.

MOŽIEŠIK, Ľ.: Monografia 1. STU v Bratislave SvF, 2008.

MOŽIEŠIK, Ľ.: Limity zmien prietokov cez stupeň Gabčíkovo s ohľadom na bezpečnosť plavby po Dunaji. Medzinárodná odborná konferencia o bezpečnosti vodných stavieb, Bratislava 2010.

MOŽIEŠIK, Ľ., VALENTA, P., ŠULEK, P., SLABÁ, V.: Modelovanie prúdenia vody a pohybu plavidiel v oblasti vodných stavieb. Zborník Plavebné dni, Piešťany 2002.

Tento článok vznikol na základe finančnej podpory projektov grantovej agentúry VEGA 1/0660/12.

Andrea Palkovičová: Modelling of Hydraulic Flow Parameters in the Evaluation of Navigation Conditions. Application at the Selected Water Structure.

Abstract

At the multipurpose water structures involving more objects than just a lock, hydroelectric powerplant or weir, there appears the flow influence caused by the operation of these objects and the influence of routing of vessels by the forces of the flowing water. Optimal a safety movement of the vessels on the flowing water, as well as the navigation and controllability relates with the size of flow amount change at the operations of weir or hydroelectric powerplant, the time course of this operation mode, slope level of water surface and direction of a moving vessel in the channel. In terms of potential threats of safety navigation and transport capacity restrictions, the most critical area of is the stretch of transition from free tracks into the lock. The result of the adverse impact of the flow mode on vessels can be the collision with another vessel, the impact on the functional object of the water structure or the impact on the banks of waterway. Currently, the research and verification of nautical conditions on navigable watercourse uses mainly mathematical modelling. Mathematical model represents the idealization of actual physical system in a form of mathematical expressions which is mostly expressed in a form of partial differential equations in the engineering practice. By using the simulations, we can examine the response of the mathematical model to changes in input data and correct the operating parameters of the real water structures. For the current situation at the international Danube waterway, it is important that the short stretch of a river passing throughout Slovakia ensures a sufficient maritime safety and transport capacity. The field of VEG operation impact on the navigation safety at the relevant section of River of Danube should be examined. River 2D is a two-dimensional modeling system for modeling the water flow mode with free surface and allows solve exactly the steady and unsteady two-dimensional turbulent flow of water in areas with a complex geometry. The areas examined this software represents approximately three kilometers section of the upstream channel just above the VEG and approx. two km stretch of downstream channel just below VEG. The basis for the creation of a mathematical model was the geometry of the channel in the transverse and longitudinal directions and measurement of flow and level for the flow, which formed the model boundary conditions. The most important output of the mathematical model simulating of spatial flow close the water structures with navigation mode is the flow velocity field. When water is flowing in the study area the complex current circumstances appears, that are being measured with a lot of difficulties on the physical moths - the direction of the velocity vector can be only estimated. On the basis of assessing the operation of facilities VD navigation safety it is possible to form the measures to minimize negative impacts or even eliminate.