

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Юбилейна приложна научно-техническа конференция
„65 години Хидротехнически факултет и 15 години немскоезиково обучение”

6–7 ноември 2014
6–7 November 2014

International Jubilee Conference
„65th Anniversary Faculty of Hydraulic Engineering and 15th Anniversary Hydraulic Engineering in German”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

XLVII ^{том}
vol.

2014

св.
fasc. I-A

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕСТНАТА ЕРОЗИЯ ПРИ ФЕРИБОТЕН ТЕРМИНАЛ “НИКОПОЛ”

Н. Лисев¹, П. Тодоров², В. Кукурин³, С. Тачев⁴

Ключови думи: хидравлика, 2-D числено моделиране, ерозия на дъното, седиментен транспорт

Научна област: инженерна хидрология, хидравлика и водно стопанство

РЕЗЮМЕ

Обтичането на хидротехническите съоръжения неминуемо води до промяна на хидравличните параметри на потока. Тази промяна най-често се изразява в поява на вихрови зони и локални ускорения. Това от своя страна е основна причина за възникването на локални ерозионни процеси в зоната на съоръженията, представляващи сериозна опасност за тяхната експлоатационна и конструктивна сигурност. Много важна част от проектирането на хидротехнически съоръжения, особено такива със сложна геометрия, е дефинирането на хидравличните характеристики на течението в зоната на съоръжението, анализ и оценка на мащаба на очакваната местна ерозия, с оглед предприемане на подходящи/адекватни конструктивни решения.

Настоящата статия представя изследване на местната ерозия в зоната на фериботен терминал “Никопол”. Изследването е проведено на два етапа. В първия е направена чисто аналитична оценка на максималните дълбочини на изравяне, изчислени с помощта на намиращите най-широко приложение в практиката емпирични зависимос-

¹ Николай Лисев, доц. д-р инж., кат. “Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: lisev_fhe@uasg.acad.bg

² Петър Тодоров, инж., кат. “Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: peter_v@gyuvetch.bg

³ Владимир Кукурин, инж. докторант, кат. “Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: v_kukurin@yahoo.com

⁴ Сава Тачев, д-р инж., кат. “Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: sava371@abv.bg

ти. Във втория етап е изготвен числен 2-D модел на съоръжението, с чиято помощ е получено разпределението на скоростите в план и е проследено развитието на ерозионните ями, използвайки няколко различни изчислителни метода.

Резултатите от двата подхода са сравнени и дискутирани.

1. Въведение

Процесите на местна ерозия след хидротехнически съоръжения са едни от най-комплицираните явления в областта на речната хидравлика. Геометричните параметри на ерозионната яма, чието определяне е ключов фактор за осигуряване устойчивостта и нормалната работа на съоръженията, са обект на стотици изследвания. Множеството от тях са проведени в лабораторни условия върху дребномашабни физически модели, поради което резултатите предоставят предимно качествена оценка на явленията. Опитите за извеждане на точни количествени зависимости между хидравличните и морфоложки характеристики в зоната на съоръжението и геометричните и времеви параметри на ерозионната яма не могат да претендират за абсолютна прецизност и общовалидност. Необходимо е калибриране на експерименталните резултати от лабораторните тестове със съответни натурни наблюдения, което среща значителни затруднения поради редица фактори.

На първо място стои невъзможността за директно проследяване на процесите в реални условия. За тях може да се съди единствено на база окончателното състояние на ямата. NCHRP 2012 сочат, че след преминаване на високите води и възстановяване на нормалния отток в реката, в ерозионната яма се отлагат наноси и следователно измерените впоследствие геометрични параметри не отговарят на максимално достигнатите.

Измерването на възникналата ерозионна яма в реални условия за повечето случаи е трудо-, време- и ресурсоемък процес. В повечето случаи отговорните институции не са склонни да финансират подобни начинания, въпреки че получената информацията би могла да допринесе за предотвратяване на бъдещи аварии или значително редуциране на разходите по отстраняването им.

Не на последно място следва да се отбележи фактът, че появата на екстремно явление, предизвикващо мащабна ерозия, е възможно да отнеме десетилетия. Тази обвързаност на ерозионните процеси със стохастичните природни явления затруднява изключително много натурните изследвания.

Горепосочените ограничения са причина за оскъдната информация от наблюдения върху съществуващи съоръжения.

Физическите моделни изследвания позволяват дефиниране и изолиране на отделните параметри, оказващи влияние върху ерозионните процеси. Опитната постановка неизбежно се изпълнява при редица опростяващи предпоставки и приемания, поради което не съответства напълно на естествените условия. Именно поради това е важно да се подхожда внимателно при прилагането на получените експериментални резултати към натурни условия.

Настоящата статия представя изследване на местната ерозия в зоната на фериботен терминал "Никопол". Пристанът на съоръжението е оформен като рампа, навлизаща косо в речното корито, като в зависимост от водното ниво в реката, рампата се залива до различна кота.

Изследването е извършено по два метода. Първият се състои в прилагане на емпирични зависимости за определяне на граничната неизравняща скорост и максималната (равновесна) дълбочина на ерозионната яма, придобили популярност в специа-

лизираната литература. При втория метод е използван двумензионален числен хидравличен модел, с помощта на който са изчислени скоростното поле в зоната на съоръжението и настъпващата вследствие на течението местна ерозия на дъното.

2. Оценка на стабилитета на дъното чрез прилагане на емпирични формули

В литературата се срещат две групи формули (всичките емпирични, изведени по данни от натура или от хидравлични модели) за определяне на граничната скорост, превишаването на която води до раздвижване и изнасяне на пясъчните частици, съставлящи дъното на реката.

- **Първа група А:** са тези формули, които изчисляват граничните скорости спрямо дънната по вертикала скорост V_d .
- **Втора група В:** са тези формули, които изчисляват граничните скорости спрямо средната по вертикала скорост V .

2.1. Формули за граничните неизравнящи скорости от група А

Формула на Г.И. Шамов – 1969 год.

$$V_{гр.изр.}^D = 4,4 d_{50}^{1/3} H^{1/6},$$

където d_{50} е среден диаметър на дънните наноси [m];

H – дълбочина на течението при съоръжението [m].

Формула на Гончаров – 1967 год.

$$V_{гр.изр.}^D = \sqrt{\frac{2g(\rho_{пяс} - \rho_{вода})}{3,5\rho_{вода}}} d_{50} \lg \frac{8,8H}{d_{95}} 4,4,$$

където $\rho_{пяс}$ е специфична плътност на скелета на пясъка ($\rho_{пяс} = 2,67 \text{ g/cm}^3$);

d_{95} – диаметър на едрите фракции, представляващи 5% от общия обем.

Формула на Ибад-Заде – 1975 год.

$$V_{гр.изр.}^D = (Re_d)^{0,125} \sqrt{2K_y} \sqrt{\frac{\gamma_{пяс} - \gamma_B}{\gamma_B} g d_{50}},$$

където:

$$Re_d = \frac{V_* d_{cp}}{\nu}, \quad K_y = \frac{0,19H}{0,52\sqrt{H} - 0,009} \cdot \frac{0,19H}{0,42 + 0,11 \frac{0,19H}{0,52\sqrt{H}} - 0,009}.$$

2.2. Формули за граничните изравящи скорости от група В

Формула на Студеничников – 1972 год.

$$V_{\text{гр.изр.}}^{\text{ср}} = 3,6 \sqrt[4]{d_{50} H} .$$

Формула на Леви – 1969 год.

$$V_{\text{гр.изр.}}^{\text{ср}} = 3,2 \sqrt[2]{d_{50} g} \log \frac{H}{7 d_{50}} .$$

Формула на Rotner – 1965 год.

$$V_{\text{гр.изр.}}^{\text{ср}} = \frac{2,45 \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^{2/3}}{0,0672 \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^{2/3} + 0,0141} .$$

Формула на Van Rijn – 1985 год.

Специално за пясък с $0,1 < d_{50} < 0,5 \text{ mm}$

$$V_{\text{гр.изр.}}^{\text{ср}} = 0,19 d_{50}^{0,1} \log \frac{12 R_D}{3 d_{85}} ;$$

$$R_D = 0,95 \cdot 10,2 = 9,70 .$$

Формула на HRE (HEC-18)

$$V_{\text{гр.изр.}}^{\text{ср}} = 11,17 H^{1/6} d_{50}^{1/3} ,$$

където H и d_{50} са във футове.

В следващата таблица са показани изчислените стойности на граничните неизравящи скорости в района на фериботния терминал при водно количество в река Дунав $Q_{\text{ср.макс.}} = 10\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ ($H = 10,8 \text{ m}$) и среден диаметър на фракцията $d_{50} = 0,28 \text{ mm}$.

**Таблица 1. Гранични неизравящи скорости при $Q_{\text{ср.макс.}} = 10\,300 \text{ m}^3/\text{s}$
($H = 10,8 \text{ m}$) и среден диаметър на фракцията $d_{50} = 0,28 \text{ mm}$**

Използвана формула на:	Дънни скорости [m/s]		Средни по вертикала скорости [m/s]	
	По формули	По хидрометричен път	По формули	По хидрометричен път
Формула на Г. И. Шамоу	0,43	0,67		1,20
Формула на Гончаров	0,55	0,67		1,20
Формула на Студеничников			0,83	1,20
Формула на Rotner			0,98	1,20
Формула на HRE (HEC-18)			0,63	1,20
Формула на Van Rijn			0,51	1,20

От таблицата е видно, че независимо дали граничните неизравящи скорости са изчислени спрямо дънните или спрямо средните по вертикала, скоростите са по-ниски от действителните. *Следователно движението на дънните пясъци е неизбежно и реално ще последва изравяне на дъното.*

2.3. Хидравлични изчисления за определяне на дълбочината на изравяне на дъното по различни емпирични формули

Формула на HRE (HEC-18)

$$\frac{h_{\text{изр}}}{H} = 4,0 Fr^{0,33},$$

където H – дълбочина на течението при съоръжението преди изравяне;

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot H}} = \frac{1,10}{\sqrt{9,81 \cdot 10}} = 0,11.$$

Формула на Melville

$$\frac{V_{\text{ср}}^B}{V_{\text{кр}}} = \frac{1,10}{0,32} = 3,43 > 1,0;$$

$$\frac{H}{L} = \frac{10}{80} < 1,0;$$

$$\frac{L}{d_{50}} = \frac{80}{0,003} = 266.10^3 > 25;$$

$$\frac{h_{\text{изр}}}{L} = 2 \sqrt{\frac{L}{H}} K_s K_\alpha.$$

Формула на Maryland

$$h_{\text{изр}} = (K_v)^{0,857} K_f K_p H$$

K_v – скоростен коефициент. Варира от 1,01 до 1,80 в зависимост от степента на стеснение на течението. В случая $K_v = 1,15$;

K_f – коефициент, отчитащ турбулентността на течението в зоната на локалното стеснение на сечението

$$K_f = 0,13 + 5,8 Fr = 0,774;$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}} = \frac{1,10}{\sqrt{9,81 \cdot 10}} = 0,11,$$

K_p – коефициент, отчитащ ефекта от повишение на хидродинамичното налягане;

$$K_p = 0,66Fr^{0,45} = 1,7,$$

V – средна скорост на течението във вертикалата.

Формула на Froelich

$$\frac{h_{\text{изр}}}{H} = 0,78K_s K_\theta \left(\frac{L}{H}\right)^{0,63} Fr^{1,16} \left(\frac{H}{d_{85}}\right)^{0,43} \sigma_g^{-1,87} + 1,$$

K_s – коефициент ($K_s = 0,50$);

K_θ – коефициент, зависещ от ъгъла, който съоръжението сключва с оста на основното течение. За ъгъл около 60° ($K_\theta = 0,92$);

$$\sigma_g \text{ – коефициент на разнородност на материала, } \sigma_g = \left(\frac{d_{85}}{d_{15}}\right)^{1/2};$$

L – дължина на съоръжението;

H – дълбочина на течението при съоръжението преди изравяне;

K_α – коефициент, зависещ от ъгъла, който съоръжението сключва с оста на основното течение. За ъгъл около 60° ($K_\theta = 0,92$), отчетен от график 9.7f, Graf, Fluvial Hydraulics;

K_s – коефициент зависещ от геометричната форма на съоръжението. За съоръжение с плавно извита в план форма и наклонен откос ($K_s = 0,50$), отчетен от график 9.7e, Graf, Fluvial Hydraulics.

Формула на Young

$$\frac{H_{\text{изр}}}{H} = \left[\frac{(nV_R)^2}{S(\rho_{\text{ск}} - 1)d_{50}\sqrt[3]{H}} \right]^{3/7},$$

$H_{\text{изр}} = h_{\text{изр}} + H$ – обща дълбочина в мястото на изравяне;

H – дълбочина на течението преди изравяне;

$h_{\text{изр}}$ – дълбочина на изравяне под дъното;

n – коефициент на грапавина във формулата на Манинг ($n = 0,027$);

$\rho_{\text{ск}}$ – специфична плътност на скелета на пясъка ($\rho_{\text{ск}} = 2,67$);

d_{50} – среден диаметър ($d_{50} = 0,003$ m);

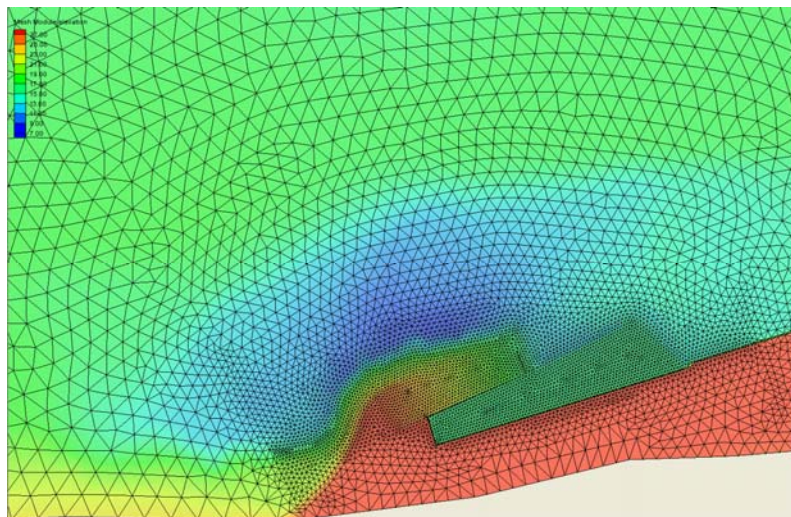
V_R – резултантна скорост след построяване на съоръжението (в случая средна по вертикала скорост за съответното водно количество).

Таблица 2. Максимални дълбочини на изравяне при фериботен терминал “Никопол”, изчислени чрез емпирични формули

Формула за изчисляване на дълбочините на изравяне	$Q_{\text{река}} \text{ [m}^3/\text{s]}$		
	7000	10300	16350
	Дълбочини на изравяне [m]		
Формула на HRE (HEC-18)	14,90	18,50	21,80
Формула на Melville	19,50	21,90	24,00
Формула на Maryland	7,50	9,20	11,50
Формула на Froelich	13,70	17,50	21,20
Формула на Young	19,20	21,20	23,40

3. Оценка на стабилитета на дъното чрез използване на математически модел

Изчисленията са извършени с математическия модел RiverFLO-2D. Това е двуменсионален хидродинамичен модел и модел за изчисляване на подвижно дъно, използващ метод на крайните елементи с възможност за извършване на изчисления както в бурно, така и в спокойно състояние на течението. За построяването на моделния участък е използвана батиметрична снимка на дъното в района на съоръжението, работни чертежи на самото съоръжение, както и напречни профили на реката. Използвана е неструктурирана мрежа с триъгълни елементи. Гъстотата на мрежата е по-голяма в района на съоръжението, а размерът на елементите се увеличава към границите на моделираната зона. Схеми на изчислителната мрежа могат да бъдат видени на следващите фигури.

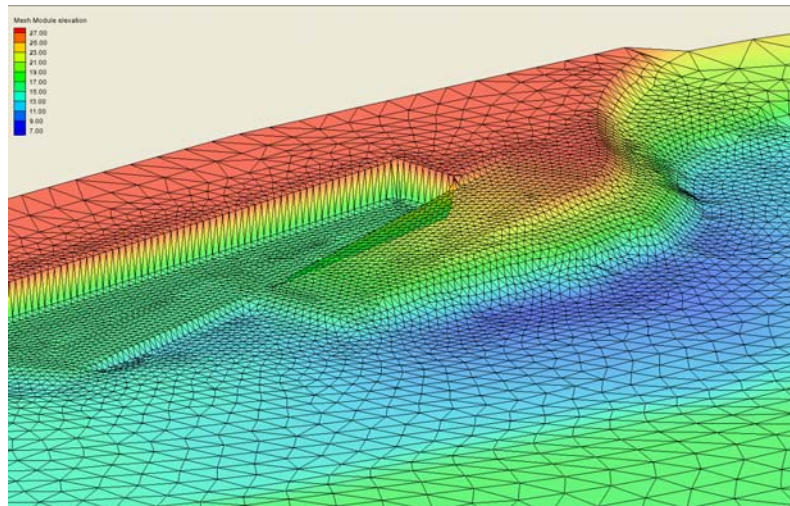


Фиг. 1. Неструктурирана изчислителна мрежа от триъгълни елементи района на ФК “Никопол”

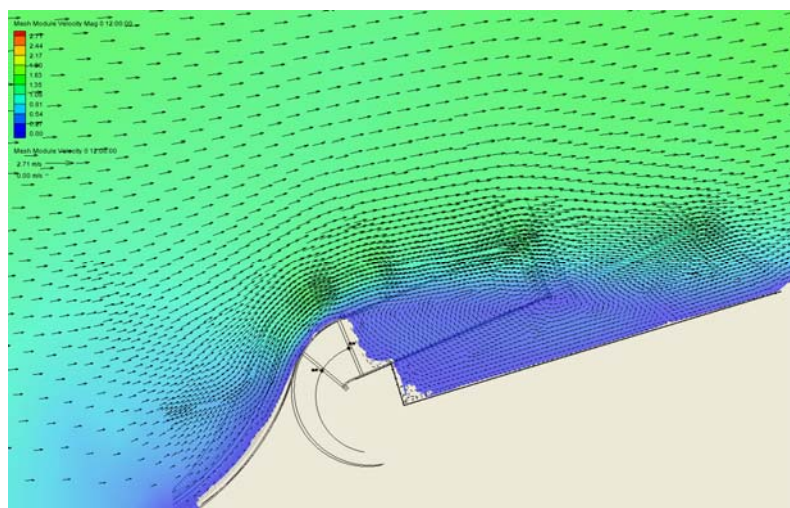
Изчисленията са извършени за нестационарно течение, като времевият период е подбран достатъчно дълъг, така че да се наблюдава установяване на ерозионните про-

цеси. Получени са всички хидродинамични параметри на течението, в това число скорости, дълбочини, число на Фруд, максимални влачещи сили и др. На Фиг. 3 е показано изчисленото скоростно поле при протичане на $Q_{\text{ср.макс.}} = 10\,300 \text{ m}^3/\text{s}$.

Въз основа на получените локални скорости е изчислена и формиращата се ерозионна яма. Моделът дава възможност да се използват шест различни формули за оценка на транспортиращата способност на течението – Meyer-Peter and Muller, Yang, Ackers-White, Karim-Kennedy, Toffaleti и Wilcock-Crowe специално за чакълени речни легла.



Фиг. 2. Неструктурирана изчислителна мрежа от триъгълни елементи в района на ФК "Никопол" – аксонометрия



Фиг. 3. Изчислено скоростно поле в района на ФК "Никопол" при протичане на $Q_{\text{ср.макс.}} = 10\,300 \text{ m}^3/\text{s}$

За целите на изследването са ползвани първите 5 от посочените формули, като за всяка една са проследени ерозията и акумулирането на дънни наноси във времето. Като резултат са получени ерозионните зони и зоните на отлагане в крайния момент на изчисленията, когато настъпва затихване на процеса. Примерен резултат, получен чрез формулата на Yang за пясъчно дъно, е показан на Фиг. 4. По сходен начин са получени и резултатите чрез използване на останалите формули. Анализът показва, че резултатите са доста близки, като показват максимална дълбочина на ерозионната яма около 1,6 m, което е близко до измерените при експлоатацията на съоръжението стойности в натура. Разликите в дълбочините, получени по различните формули, използвани от математическия модел не надвишават 0,3 m.



Фиг. 4. Зони на изравняне и отлагане на наноси в района на ФК “Никопол” при протичане на $Q_{\text{ср.макс.}} = 10\,300 \text{ m}^3/\text{s}$

4. Заключение

Представените резултати показват, че използваните до момента емпирични зависимости дават стойности, които в конкретния случай са сериозно завишени. Утвърждаващите се напоследък в инженерната практика 2D математически модели, които се базират на хидродинамичното поле на течението, дават по-надеждни резултати. От друга страна, работата с тези модели е по-сложна и трудоемка и изисква значителни ресурси и качествена входна информация. Самите модели са много чувствителни по отношение избора на гранични условия и изискват сериозен опит при работата с тях, в противен случай е налице значителен риск от получаване на компрометирани резултати.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Breusers, H. N. C.* Conformity and Time Scale in Two-dimensional Local Scour, Proc. Symp. on Model and prototype conformity, Hydr. Res. Lab., Poona, India, 1–8., 1966.
2. *Chane, B.* Two-dimensional Local Scour In Erodlble Bed Downstream Solid Apron – Master's Thesis, Tampere University of Technology, Finland, February 1984.

3. *Kotoulas, D.* Das Kolkproblem unter besonderer Berücksichtigung der Faktoren "Zeit" und Geschiebemischung" im Rahmen der Wildbachverbauung, Schweizerische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Vol 43, Heft 1., 1967.

4. *NCHRP* Summary of Progress, 2012.

5. *Schoppmann, B.* The Mechanics of Flow and Transport of a Progressive Scour, Proceedings, vol. 2 XVIth Congress of the International Association for Hydraulic Research, Sao Paulo, Brasil, 1975.

6. *Tsuchiya, Y.* On the Mechanism of the Local Scour from Flows Downstream of An Outlet, Proceedings, Twelfth Congress of the International Association for Hydraulic Research, vol. No. 3 Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA, 11-14 September 1967.

7. *Watkins, R. D.* Aust, M.I., Local Scour in Beds of Sand and Gravel Downstream from a Solid Apron, Civil Engineering Transactions, April 1969.

8. *Студеничков, В. И.* Размывающая способность потока и методы русловых расчетов, Москва 1964.

STUDY OF THE LOCAL SCOUR AT FERRYBOAT TERMINAL "NIKOPOL"

N. Lissev¹, P. Todorov², V. Kukurin³, S. Tachev⁴

Keywords: hydraulics, 2-D numerical modeling, bed scour, sediment transport

Research area: hydrology, hydraulics and water management

ABSTRACT

The flow around hydraulic structures inevitably leads to changes in the local flow field. Most commonly these changes consist in eddy formation and flow acceleration. They are the main reason for occurrence of local bed scour around the structures, which is a common reason for structure failure. One of the most important parts of the hydraulic design, especially of complex shaped structures, is the correct evaluation of the expected local scour parameters.

The present article presents a study of the local scour at ferryboat terminal "Nikopol". The study is carried out in two stages. In the first one the scour is evaluated, using the most widely used popular empirical formulas. In the second phase of the study a 2-D numerical model of the structure is created. Its main purpose is to evaluate the velocity distribution and the location and development of local scour by using different numerical methods.

The results according to both approaches are compared and discussed.

¹ Nikolay Lissev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dpt. "Hydraulics and Hydrology", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: lisev_fhe@uacg.acad.bg

² Petar Todorov, Eng., Dpt. "Hydraulics and Hydrology", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: peter_v@gyuvetch.bg

³ Vladimir Kukurin, Eng., Dpt. "Hydraulics and Hydrology", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: v_kukurin@yahoo.com

⁴ Sava Tachev, Dr. Eng., Dpt. "Hydraulics and Hydrology", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: sava371@abv.bg