

ИЗСЛЕДВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ЕРОЗИОННАТА ЯМА СЛЕД НИСКОНАПОРНИ ХТС

П. Тодоров¹, Н. Лисев², В. Кукурин³, С. Тачев⁴

Ключови думи: местна ерозия, физическо хидравлично моделиране, нисконапорни хидротехнически съоръжения

Научна област: инженерна хидрология, хидравлика и водно стопанство

РЕЗЮМЕ

В настоящата публикация са представени резултати от физическо моделно изследване върху процесите на местна ерозия след нисконапорни хидротехнически съоръжения, проведено върху опитна постановка от общ характер. Разгледани са моделни тела с откосирана отводяща част и вариация на наклона, съответстващи на праг тип дънна рампа с неукрепен долен участък. Проведени са две групи серии от тестове в условия на неподвижно и подвижно дъно. При първата са установени кинематичните и динамичните характеристики на течението за три хидравлични схеми. Въз основа на записи на моментните стойности на хидродинамичното налягане в придънната зона и скоростните вектори в хоризонтални равнини са получени статистически параметри, характеризиращи съответните процеси. Серииите с подвижно дъно са проведени с три типа несвързан дънен материал. Установени са геометричните характеристики на ерозионната яма, възникнала при идентични на тестовете с неподвижно дъно хидравлични условия. Потърсена е корелация между зоните с изразено повишение на турбулентната интензивност след моделните съоръжения с неподвижно дъно и формата и положението на ерозионната яма. Наблюдаваните закономерности са анализирани и сравнени с литературни данни и резултати от аналогични изследвания.

¹ Петър В. Тодоров, инж., кат. „Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Христо Смирненски” 1, 1046 София, e-mail: peter_v@gyuvetch.bg

² Николай П. Лисев, доц. д-р инж., кат. „Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Христо Смирненски” 1, 1046 София, e-mail: lisev_fhe@uacg.acad.bg

³ Владимир Г. Кукурин, инж., кат. „Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Христо Смирненски” 1, 1046 София, e-mail: v_kukurin@yahoo.com

⁴ Сава Б. Тачев, д-р инж., кат. „Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Христо Смирненски” 1, 1046 София, e-mail: sava371@abv.bg

1. Въведение

Агресивното въздействие на течащата вода върху речни легла с отложения от алувиален характер представлява водещ фактор при определяне на устойчивостта, сигурността и дълготрайността на съоръжения от инженерната инфраструктура. В резултат от възникналите размиви в зоната на дънни прагове, рампи, преливаеми язове, изтичала на МВЕЦ, тръбо-, нефто- и газопроводи, мостови опори и устои, пътни и железопътни насипи и др. е възможно да бъдат реализирани значителни деформации, а нерядко пълно разрушаване на съоръжението. Информацията относно ерозионната способност на течението след хидротехнически съоръжения и ерозионната устойчивост на дънния материал са определящи при избор на необходимите защитни мероприятия.

През последните няколко десетилетия са проведени редица изследвания върху процесите на обща и местна ерозия. Въпреки засиления интерес към проблема, ерозията при естествени и изкуствени деформируеми легла продължава да се счита за една от нерешените задачи в областта на речната хидравлика. От една страна, за това допринася сложната структура на течението, което се характеризира със силно изразен дву- и тримерен характер, значителна турбулентна интензивност и вихрови структури от различен порядък, чието точно проследяване създава сериозни затруднения. От друга страна, оценката на ерозионната устойчивост на дънния материал е свързана с голяма доза субективизъм. Тук следва да се отбележи фактът, че масово изследванията върху процесите на местна ерозия се извършват в лабораторни условия, а резултатите рядко биват верифицирани върху натурни обекти. Известните към момента математически зависимости, даващи връзката между геометрията на съоръжението, хидравличните и морфоложки характеристики, от една страна, и параметрите на ерозионната яма, от друга, имат предимно емпиричен или теоретико-емпиричен характер. Проведените систематични изследвания съвсем не могат да претендират за пълнота, а резултатите от тях биха могли да служат предимно за качествена оценка.

2. Местна ерозия при хидротехнически съоръжения

Геометричните параметри на ерозионната яма след хидротехнически съоръжения са обект на множество изследвания, водещи началото си от началото на XX век. Акцентът в преобладаващата част от трудовете пада върху максималната или т.нар. еквивалентна дълбочина на ерозионната яма.

Лабораторни изследвания върху свободно преливане (непотопено) при директно взаимодействие между изтичащата струя (вертикална и наклонена) и подвижното дъно са проведени от Schoklitsch 1932, Veroneze 1937, Eggenberger 1943, Kotoulas 1967, Студеничков 1962, Machado 1982B; Mirtshulava et al 1967, Mikhalev 1960. Whittaker & Schleiss 1984 представят подробен анализ на хидромеханичните основи на генераторите на местна ерозия, сред които хидравличния скок и свободно изтичащи вертикални и наклонени струи след изхвъргачи. Тези две форми на свързване на нивата са характерни за високонапорни съоръжения, но хидродинамичната картина при ниско и средно напорни съоръжения бележи известно сходство при определени режими на работа. Whittaker & Schleiss 1984 представят обзор на редица емпирични зависимости, чиято приложимост в натурни условия бива оценена въз основа на сравнителен анализ с резултати от наблюдения върху деформациите на дъното след облекчителните съоръжения на две високи язовирни стени в Зимбабве и Мозамбик.

Mason & Agumugam 1985 предлагат обстоен обзор на наличните към момента зависимости за определяне дълбочината на ерозионната яма след високонапорни съоръжения. Обобщавайки данни от 73 обекта (натурни и моделни) за изравяне при свободни струи, формирани от изхвъргачи и преливници на високи стени, авторите предлагат нова емпирична формула за определяне на максималната дълбочина на ерозионната яма, покриваща широк спектър от условия.

Друга основна форма на хидравлична връзка на нивата, при която възникват значителни ерозионни процеси, представляват хоризонталните потопени и непотопени струи, формирани при изтичане под щит. Тя е характерна за регулируеми съоръжения. При нея ерозионното действие се обуславя от хоризонталната струя, разпространяваща се с висока скорост директно или индиректно (след рисберма) върху подвижното дъно. Лабораторни изследвания върху модели от този тип са извършени от Veroneze 1937, Eggenberger 1943, Catakli et al. 1973, Shalash 1959, Hoffmans & Verheij 1997 и др.

Изравяния след нисконапорни съоръжения са изследвани от Bormann & Julien 1991, Comiti et al. 2001, Lenzi et al. 2002, Adduce & La Rocca 2006, Uchida, & Fukoka 2006, Lu et al. 2012 и редица др. Bormann & Julien 1991 извеждат теоретико-емпирична зависимост за определяне размера на ерозионната яма, която е тествана върху едромашабен физически модел. В основата на теоретичния анализ са поставени механизмът на дифузия на струята след съоръжението и устойчивостта на частиците несвързан материал от повърхността на ямата. По своята форма предложената зависимост е аналогична на формулата на Mason & Agumugam 1985, валидна за високонапорни съоръжения. Практическото приложение на тази зависимост налага използването на редица емпирични коефициенти, чиято дефиниция се подчинява на субективни фактори и респективно предполага известно разсейване на резултатите.

Adduce & La Rocca разглеждат развитието на ерозионната яма при трапецовидно напречно съоръжение за три варианта на хидравлична връзка, съответно дънен, повърхнинен и смесен режим. В резултат на проведените лабораторни тестове е установена качествена разлика в характера на ерозионния процес в зависимост от съответния режим. Именно характеристиките на течението в долния участък като посока и кривина на токовите линии, мащаб на турбулентните макроструктури и долното водно ниво, заедно с параметрите на дънния материал се явяват водещи фактори, определящи развитието на процесите. Аналогично на Adduce & La Rocca Uchida, & Fukoka 2006 извършват теоретичен анализ на местните процеси и предлагат числено решение на проблема, базирано на модифицираните уравнения на Сен Вена-Екснер.

Пространственият характер на течението след хидротехнически съоръжения и увеличената турбулентна интензивност са водещ фактор, чийто ефект следва да бъде отчетен при определяне мащабите на ерозионната яма. Флуктуацията на налягането представлява един от показателите за порядъка на формираните макротурбулентни структури, а за стабилитета на единична частица от дънния материал при грапаво турбулентен режим критични се явяват екстремните му моментни стойности. Изследвания в тази област са проведени от Rose 1958, Abdul Khader & Elango (1974), Akbari, et al. (1982), Lopardo et al. 1982, EI-Kashab (1987), Gioia et al (1979b) и др. (Hager 1992). В преобладаващата част от трудовете пространственото изменение на полето на наляганята е обвързано с подходните условия и съответното число на Фруд. Abdul Khader & Elango (1974) разглеждат флуктуацията на наляганята и вариацията в надлъжна посока в рамките на хидравличния скок при неподвижно дъно. За преминаване към бездимензионна форма е възприето отношението на средноквадратичното отклонение на пулсационните добавки \sqrt{p}^2 към хидродинамичното налягане $v^2/2\rho$, което се дефинира като показател на налягането. Като показател за подобие е възприето отно-

шението между разстоянието от началото на скока X до разглежданото сечение и дължината на хидравличния валак L_r .

Данните, получени от Abdul Khader & Elango (1974), сочат като съществен фактор, определящ максималната флукуация на налягането, освен числото на Фруд, още подходящите условия. Съществена разлика в пиковите стойности е установена за развити и развиващи се подходящи условия.

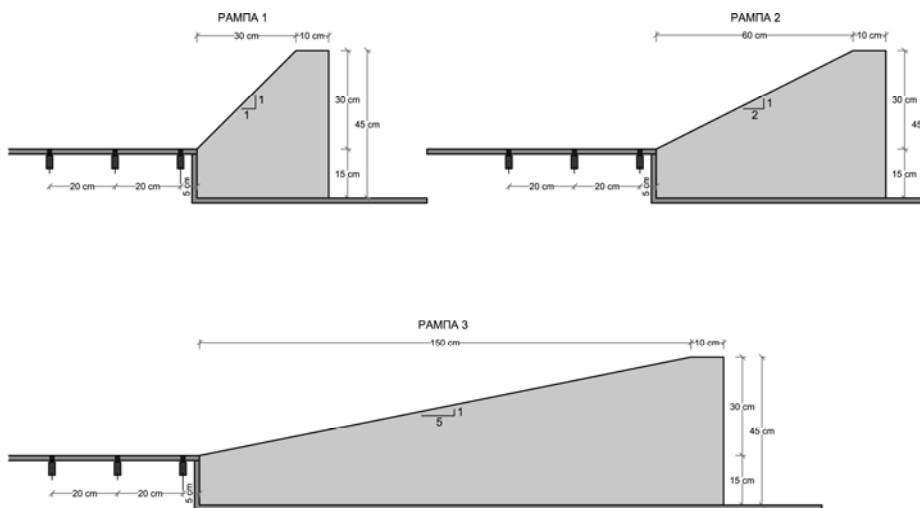
3. Хидравличен модел

Локалният ерозионен потенциал и параметрите на ерозионната яма след нисконапорни ХТС са изследвани посредством серии от лабораторни тестове, проведени в Централната научноизследователска лаборатория за хидравлични изследвания при УАСГ. Акцентът в разработката е поставен върху влиянието на геометричните параметри на хидротехническото съоръжение, кинематиката на течението и характеристиките на несвързания дънен материал. За целите на изследването са изпълнени две основни схеми, една с неподвижно и една с подвижно дъно.

Опитна постановка

Физическият модел е изпълнен в опитен канал с правоъгълно напречно сечение, ширина 0,389 m, дълбочина 0,73 m и дължина 22 m, определящ двумерния характер на течението. Страничните стени на канала в работния участък са прозрачни, а дъното – стоманено. Работният участък има дължина от приблизително 5 m, като в същия са инсталирани съоръженията, изработени от PVC-плоскости с изключително ниска абсолютна грапавина.

Разгледани са съоръжения от тип дънна рампа с къса бързоточна част при вариация на наклона от 1:1, 1:2 и 1:5 (В:Х), съответстващи на няколко характерни форми на защитни съоръжения. Моделните тела са оформени в полигонален профил с вертикална стена от страна на горния подхожден участък с височина 45 cm. Билото на преливните тела е фиксирано на 30 cm над дъното на долния участък. Хидравличната схема и при трите варианта съответства на непотопен преливник, практически профил с полигонално очертание.

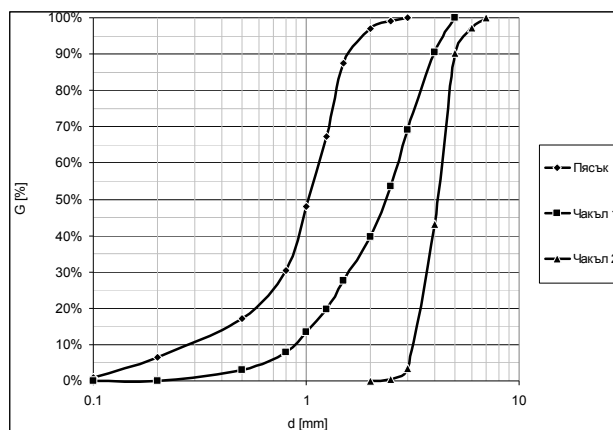


Фиг. 1. Моделни тела (рампи) – неподвижно дъно

Кинематичните и динамичните характеристики в долния участък са изследвани върху серия от тестове при неподвижно дъно (фиг. 1). Идентични хидравлични параметри са поддържани и при сериите от тестове в условия на подвижно дъно. Въз основа на записи на моментните скорости и налягания в придънната зона са получени редици, чиято статистическа обработка позволява оценка на турбулентната интензивност и нейната динамика по дължина на долния участък. Тъй като в условия на преходен и напълно развит турбулентен режим в пограничната зона основно влияние върху задвижването на отделните частици играе турбулентната пулсация и по-конкретно пиковите (екстремните) стойности на налягането, избраният експериментален подход дава възможност да бъде проследена връзката между нея и геометричните параметри на ерозионната яма след съоръженията. При тези предпоставки е разгледана корелацията между мащабите на ерозионната яма и хидродинамичните условия, представящи основен генератор на местни деформации.

Материали за подвижно дъно

Избрани са три породи несвързан дънен материал с различна зърнометрия. Най-финият от трите попада в категорията на едрозърнест пясък със среден диаметър $d_{50} = 1 \text{ mm}$. Другите две породи са нееднороден фин чакъл, обозначен като чакъл 1 и еднороден фин чакъл – чакъл 2. Зърнометричните криви и характеристичните диаметри на трите материала са представени в табл. 1.



Фиг. 2. Зърнометрични криви на дънния материал

При тези серии от тестове е извършено детайлно замерване на дълбочината, дължината и положението на ямата след достигане на квазиравновесно състояние. Като критерий за дефиниране на това състояние е възприет предложението от Delft Hydraulics такъв. Всички тестове с подвижно дъно са проведени в условия на бистри води, т.е. без подхранване с наносен материал, тъй като максималните стойности на ерозионната яма се достигат именно при такъв режим.

Таблица 1. Характеристики на дънния материал

Дънен материал	d_{10}	d_{50}	d_{90}
	mm	mm	mm
Пясък	0,2	1,1	1,6
Чакъл 1 (нееднороден фин чакъл)	0,87	2,36	4,0
Чакъл 2 (еднороден фин чакъл)	3,18	4,15	5,3

Хидравлични характеристики

Изборът на основните хидравлични параметри е извършен с оглед осигуряване на гладко дъно в долния участък след ерозионната яма, т.е. без образуване на дънни форми. За целта са определени критичната неизравяща скорост за най-финия дънен материал по литературни данни. Като първо приближение е приложен графикът на Hjulström (валиден за дълбочина на течението от 1 m) (Miedema 2012), след което са определени съответните водни количества и нива/дълбочини (при предварително възприета форма на свързване на нивата). С помощта на диаграмата на Shields е направена оценка на динамичните условия и потенциала за общ транспорт в долния участък, при възприетата схема.

В резултат на предварителния анализ са дефинирани специфични водни количества за моделните тестове от 40 l/s, 60 l/s и 80 l/s и съответно дълбочини в долния участък – 10, 15 и 20 cm. При тази предпоставка дълбочините в горния участък възлизат на приблизително 43, 45 и 47 cm, с отклонения от няколко милиметра в зависимост от пропускателната способност на преливаемото тяло.

Матрицата на изследването се състои от общо 36 теста, измежду които 1 серия от 9 теста в условия на неподвижно дъно и 3 серии по 9 теста при подвижно.

Таблица 2. Матрица на лабораторните тестове с подвижно дъно

Тест No.	q m ² /s	H ₂ m	H ₁ m	седимент	Тест No.	q m ² /s	H ₂ m	H ₁ m	седимент	Тест No.	q m ² /s	H ₂ m	H ₁ m	седимент
рампа I=1:1														
10	0,04	0,1	0,43	пясък	19	0,04	0,1	0,431	нееднороден фин чакъл 1	28	0,04	0,1	0,432	еднороден фин чакъл 2
11	0,06	0,15	0,451		20	0,06	0,15	0,451		29	0,06	0,15	0,453	
12	0,08	0,2	0,47		21	0,08	0,2	0,472		30	0,08	0,2	0,471	
рампа I=1:2														
13	0,04	0,1	0,43	пясък	22	0,04	0,1	0,431	нееднороден фин чакъл 1	31	0,04	0,1	0,432	еднороден фин чакъл 2
14	0,06	0,15	0,452		23	0,06	0,15	0,452		32	0,06	0,15	0,453	
15	0,08	0,2	0,47		24	0,08	0,2	0,471		33	0,08	0,2	0,473	
рампа I=1:5														
16	0,04	0,1	0,431	пясък	25	0,04	0,1	0,431	нееднороден фин чакъл 1	34	0,04	0,1	0,431	еднороден фин чакъл 2
17	0,06	0,15	0,453		26	0,06	0,15	0,452		35	0,06	0,15	0,452	
18	0,08	0,2	0,472		27	0,08	0,2	0,471		36	0,08	0,2	0,472	

Измервателна апаратура

Към представляващите интерес в настоящото изследване величини спадат водните нива/пиезOMETричната линия и респективно дълбочините, хидродинамичните налягания в придънната зона, локалните скорости и геометрията на ерозионната яма. Водната дълбочина на течението и профилът на формираната се ерозионна яма са измерени посредством нивомерна игла. Водните нива и профилът на формираната се ерозионна яма са измерени посредством нивомерна игла. Прецизността на измерването на водните нива е 1 mm, а на ямата в зависимост от зърнометрията на дънния материал – между 1 mm и 3 mm. Дължината на ямата и положението на характерни точки от профила са установени с помощта на предварително монтирани линейни

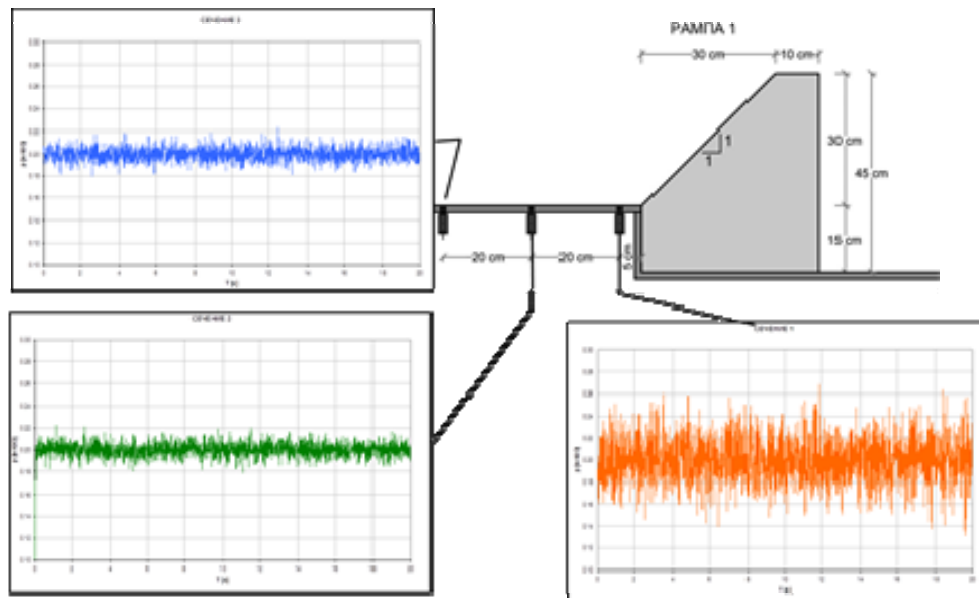
скали. Горните водни нива са установени с помощта на пиезометър, чиито отчети са привързани към нивото на недеформираното дъно в долния участък.

Средните по време скорости в мерните профили са измерени с помощта на микровитло А.ОТТ. Kempten. Моментните стойности на скоростите на течението в хоризонталната равнина X-Y са измерени посредством SonTek/YSI 16-MHz MicroADV (Acoustic Doppler Velocimeter) – Акустичен доплеров скоростомер (велосиметър) с двумерен сонда. Работният диапазон на сондата е от 1 mm/s до 2,5 m/s.

За измерване на моментните стойности на наляганията в придънна зона са използвани датчици за налягане P8AP на фирма HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK (HBM) и усилвател KWS-3073 TF-Messverstärker.

4. Резултати

Въз основа на проведените в условия на неподвижно дъно лабораторни тестове са получени характеристиките на скоростното поле в избраните характерни профили (3 бр.) от долния участък непосредствено след моделираните съоръжения за трите разглеждани хидравлични режима. В същите профили са установени моментните стойности на хидродинамичното налягане p в придънната зона (фиг. 3). Получените редици от стойности за изчислителен интервал от 20 s са обработени статистически, при придържане към възприетия от Рейнолдс аналитичен подход. Като критерий за оценка на турбулентния характер на течението е приета степента на турбулентна интензивност ϵ на налягането p и скоростните компоненти u_x и u_y в хоризонтална равнина (оси x и y).



Фиг. 3. Записи на придънните хидродинамични налягания – рампа 1;
 $Fr = 8,5$ ($q = 0,06$ l/s, $H_1 = 0,45$ m; $H_2 = 0,15$ m); $I = 1:1$

Хидродинамично налягане

$$p'_{z,i} = p_{z,i} - \overline{p_z} = 1, 2, 3, \dots, n \quad - \quad \text{пулсационна добавка на хидродинамичното налягане}$$

$$\overline{p_z} = \frac{1}{T} \int p_i dt \quad - \quad \text{усреднено по време хидродинамично налягане}$$

$$\sigma p_x = \sqrt{\overline{(p'_x)^2}} = \left(\frac{1}{T} \int p'_z{}^2 dt \right)^{0,5} \quad - \quad \text{средноквадратично отклонение}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma p_z}{p_z} \quad - \quad \text{турбулентна интензивност по отношение на средната по време скорост}$$

Скорости

$$u'_{x/y,i} = u_{x/y,i} - \overline{u_{x/y}} = 1, 2, 3, \dots, n \quad - \quad \text{пулсационна добавка на скоростта по посока на основното течение } x/\text{напречна посока } y$$

$$u'_{y,i} = u_{y,i} - \overline{u_y} = 1, 2, 3, \dots, n \quad - \quad \text{пулсационна добавка на скоростта в напречна посока } y$$

$$\overline{u_{x/y}} = \frac{1}{T} \int u_{x/y,i} dt, \quad - \quad \text{усреднени по време скорости}$$

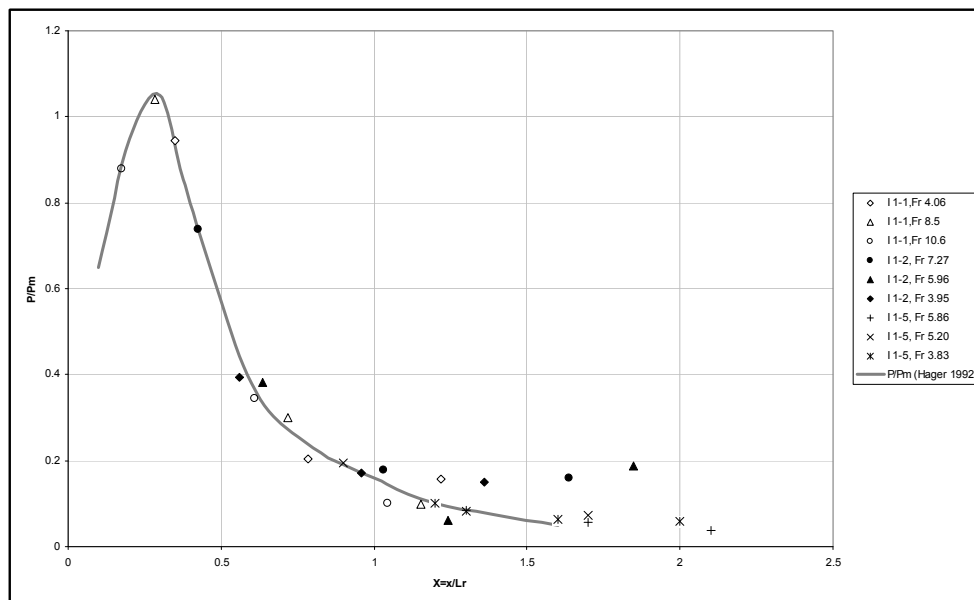
$$\sigma u_{x/y} = \sqrt{\overline{(u'_{x/y})^2}} \quad - \quad \text{средноквадратично отклонение}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma u_x}{u_x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma u_y}{u_y} \quad - \quad \text{турбулентна интензивност по отношение на средната по време скорост респективно по посока } x \text{ и } y$$

След статистическа обработка на редиците от данни за флукуацията на хидродинамичните налягания в придънната зона са получени средните по време p , максималните p_{\max} и минималните p_{\min} стойности във всеки един от мерните профили. Изчислени са средноквадратичните отклонения и турбулентната интензивност по отношение на осредненото по време налягане. За нормализиране и преминаване към бездимензионни параметри е необходимо да се изберат подходящи параметри, с помощта на които да се получат логични бездимензионни отношения за линейните размери и хидродинамичните налягания. В настоящото изследване е възприет подходът, представен от Hager 1992, при който се въвежда показател на налягането като отношение на средноквадратичното отклонение към хидродинамичното налягане в сечението непосредствено преди формирането на валяка на хидравличния скок. Като втори бездимензионен параметър се въвежда отношението на максималната пулсационна добавка и усреднената по време стойност. Двата бездимензионни параметъра по отношение на наляганята са обединени, при което се използва един единствен параметър, отчитащ както подходните условия, така и турбулентните характеристики в придънната зона. Като параметър, представляващ фактор на подобие (отношение на линейни размери), е възприето отношението X_r между разстоянието от началото на хидравличния скок до съответния мерен профил x и дължината на валяка L_r . Възприетите бездимензионни параметри и отделните им членове са дефинирани както следва:

$\frac{P}{P_m}$	– бездименсионен параметър, характеризиращ хидродинамичните налягания
$P = \frac{2\sqrt{(p')^2}}{\rho v_1^2}$	– показател на налягането
$\sigma p = \sqrt{(p')^2}$	– средноквадратично отклонение
$\rho \frac{v_1^2}{2}$	– хидродинамично налягане в сечение непосредствено преди фронта на хидравличния скок
P_m	– максимална пулсационна добавка на хидродинамичното налягане
$X = \frac{x}{L_r}$	– параметър на подобие
x	– координати на мерния профил спрямо фронта на хидравличния скок
L_r	– дължина на ваялка на хидравличния скок

Графиката на фиг. 4 представя функцията $P/P_m = f(X)$, на която освен експериментално получените точки е илюстрирана референтна крива от данни на Abdul Khader & Elango (1974) (Hager 1992):



Фиг. 4. $P/P_m = f(x/L_r)$ – експериментални точки и референтна крива по данни на Abdul Khader & Elango (1974) (Hager 1992)

Съпоставяйки резултатите от настоящото изследване с усреднената крива, представена от Nager (1992), може да се установи изключително добро съвпадение в зоната на големите пулсации, непосредствено след тялото на моделното съоръжение и известно разсейване с нарастване на X , най-ярко изразено при моделно тяло с наклон $I = 1:2$ (0,5). Получените отклонения от предложената зависимост могат да се обяснят с формирането на макротурбулентни форми, които обуславят значителните колебания в налягането при профили 2 и 3.

Отклоненията от предложената зависимост за мерните профили, попадащи в рамките на хидравличния скок, не надвишават 10%. Максималните отклонения в интервала $1 < X < 1,5$ достигат приблизително 100%. Обяснение следва да се търси отново във формираните първични макротурбулентни структури на течението.

Подвижно дъно

При провеждане на сериите от лабораторни тестове в условия на подвижно дъно са установени геометричните параметри на ерозионната яма след достигане на квазиравновесно състояние. За най-фината пясъчна порода продължителността на опитите не надхвърля 6 часа. По-едрият породи достигат това състояние за по-кратък период – около 4 – 4,5 часа.

Едрозърнест пясък

Максималните дълбочини са получени от серия 10 при най-ниско долно водно ниво, респективно специфично водно количество и наклон на откоса на моделното тяло $I = 1:1$, $Fr = 10,6$ ($h_s \approx 13$ cm). Минималната дълбочина е получена при серия 18 най-голяма дълбочина в долния участък и специфично водно количество и откос на съоръжението $1:5$ ($h_s \approx 4$ cm).

Установена е тенденция към увеличаване на мащабите на ерозионната яма с нарастване на наклона на моделното тяло и намаляване на дълбочината в долния участък. Наблюдаваните в условия на твърдо дъно параметри на хидравличния скок и формираните макротурбулентни структури се изменят с развитие на ямата. Тъй като при по-голям наклон и малка дълбочина в долния участък скокът се формира след тялото, при което възниква и леко отместване на същия, ерозионната способност на течението в тази част е най-висока. С редуциране на наклона и увеличаване на дълбочината в долния участък скокът бива потопен и пулсациите в зоната на подвижното дъно са понижени.

По отношение на геометрията на ямата може да се установи, че профилът претърпява слаби изменения в отделните серии, като положението на сечението с максимална стойност на дълбочината е при $x/L_s = 0,2$, с амплитуда от 0,1 до 0,3. Поради избрания режим на бистри води и дънни тангенциални напрежения в долния участък под критичните, определени въз основа на диаграмата на Shields, непосредствено след ямата се формира зона на отлагане. Дължината и височината на дюната е в пряка зависимост от изнесения от ямата материал. Подветреният откос е по-стръмен от надветрения – зоната на ерозионната яма след сечението е с максимална дълбочина, като ъгълът на наклон съответства на ъгъла на естествено откосиране на дънния материал от приблизително 30° .

Нееднороден фин чакъл I

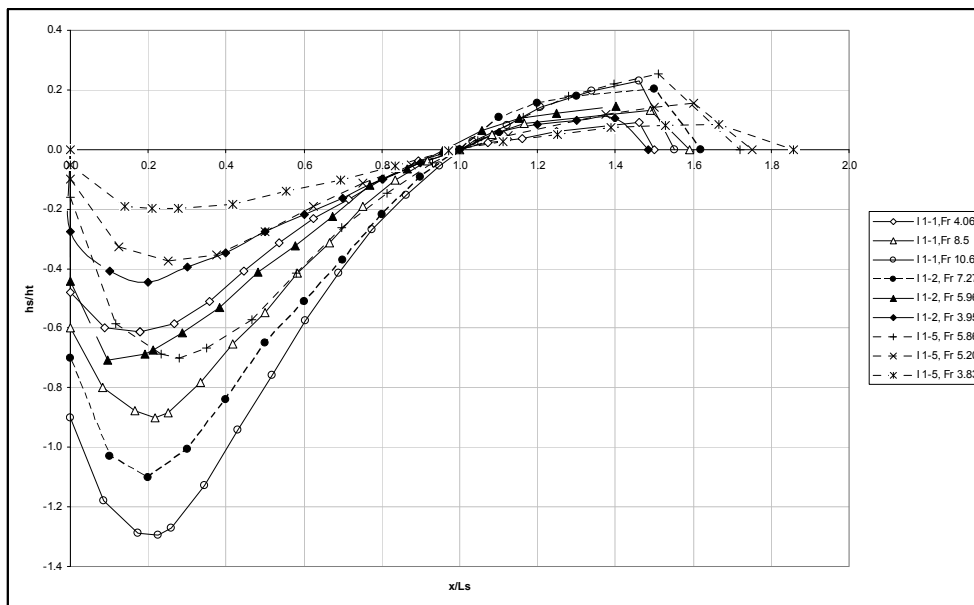
И при този материал са установени закономерностите, наблюдавани при сериите с едрозърнест пясък. Максималните достигнати дълбочини са получени от теста с

наклон на откоса на моделното тяло $I = 1:1$ и минимална дълбочина в долния участък (серия 19). Тук обаче формираната яма е с до 40% по-малка дълбочина ($h_{s,max} \approx 8,1$ cm). Минималната дълбочина е получена при серия 27 най-голяма дълбочина в долния участък и специфично водно количество и откос на съоръжението $I = 1:5$, $Fr = 3,83$ ($h_s \approx 4,25$ cm).

Налице е подобие в профила на формираната яма във всички серии. Максималната дълбочина е фиксирана при $x/L_s = 0,14 - 0,17$. Изнесенят от ямата материал се отлага непосредствено след нея, формирайки дюна с наклон на подветрената страна от около 35° , което съответства на естествения откос на седиментния материал във водонаситено състояние.

Еднороден фин чакъл 2

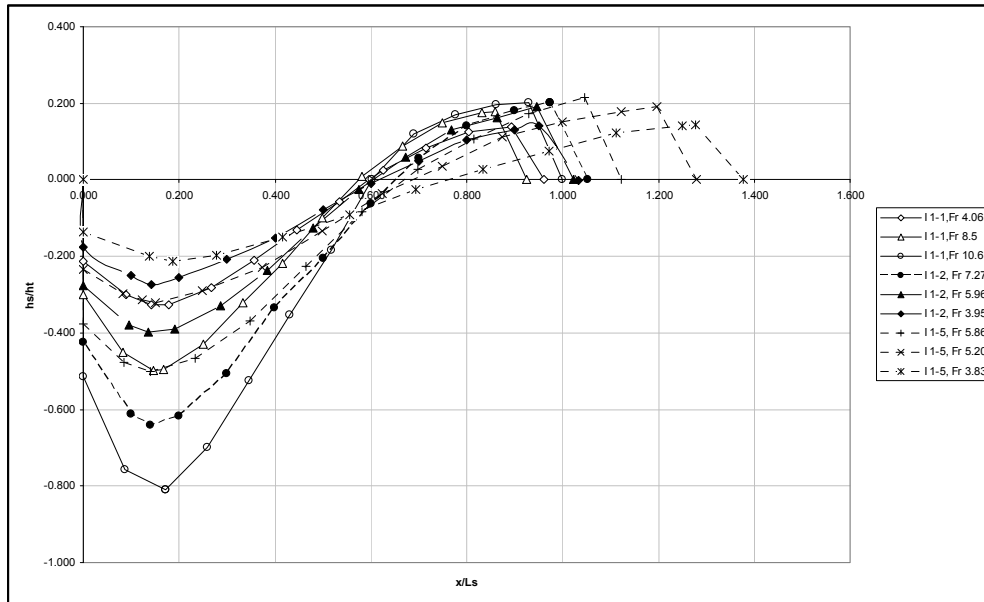
Получените стойности за максималната дълбочина на ерозионната яма са близки до тези, установени при тестовите с нееднороден фин чакъл (серии 19 – 27), въпреки по-едрия среден диаметър на материала. Регистрираните контури също са подобни. Максималната дълбочина е 7,4 cm и е получена при серия 28. И тук зоната с максимална дълбочина е в интервала $x/L_s = 0,14 - 0,17$. Отлагане на изровения материал е налице непосредствено след ямата. Наклонът на подветрената страна на формиралата се дюна е константен и е приблизително 36° .



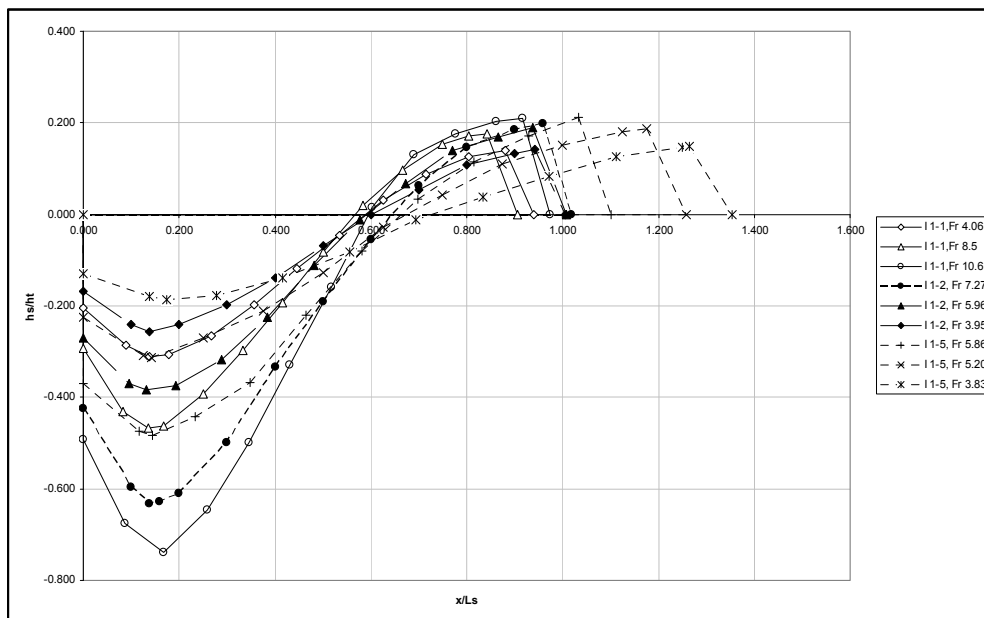
Фиг. 5. Бездимензионни профили на ерозионната яма $d_{50} = 1$ mm

Ако се сравнят резултатите от проведените измервания на динамиката на наляганята в придънната зона с тези на получените профили на ерозионната яма при трите геометрични постановки на моделни тела, може да се установят някои основни закономерности. На първо място, при фиксирани дълбочини в долния участък с увеличаване на наклона на откоса на съоръжението се наблюдава нарастване на флукутациите на налягането и дълбочината на ерозионната яма. Подобно заключение потвърждава наблюденията на Abdul Khader & Elango (1974) (Hager 1992), които отчитат като водещ фактор за формиране на хидродинамичните условия в хидравличния скок и

зоната след него освен числото на Фруд в сечението непосредствено преди фронта на скока (стесненото сечение), също и подходните условия. Именно тези условия следва да бъдат отчетени при анализа на ерозионните процеси при съоръжения, функциониращи при ниски напори.



Фиг. 6. Бездименсионни профили на ерозионната яма $d_{50} = 4,3 \text{ mm}$



Фиг. 7. Бездименсионни профили на ерозионната яма $d_{50} = 5 \text{ mm}$

5. Изводи и препоръки

Проведеното изследване обхваща серии от лабораторни тестове върху хидродинамичните условия и ерозионните процеси в зоната на нисконапорни хидротехнически съоръжения. В хода му са извършени измервания на динамиката на хидродинамичното налягане в придънната зона след моделните съоръжения, като част от програмата, предвидена за изпълнение в условия на недеформируемо/неподвижно дъно. Основната част от експерименталната програма обхваща моделиране на ерозионните процеси при деформируемо/подвижно дъно и дънен материал от несвързан тип. Основните изводи, заключения и препоръки за последващи разработки в областта могат да се обобщят както следва:

1. Ако се сравнят резултатите от проведените измервания на динамиката на наляганята в придънната зона с тези на получените профили на ерозионната яма при трите геометрични постановки на моделни тела може да се установят някои основни закономерности. На първо място, при фиксирани дълбочини в долния участък, с увеличение на наклона на откоса на съоръжението се наблюдава нарастване на флукуациите на налягането и дълбочината на ерозионната яма. Подобно заключение потвърждава наблюденията на Abdul Khader & Elango (1974) (Hager 1992), които отчитат като водещ фактор за формиране на хидродинамичните условия в хидравличния скок и зоната след него освен числото на Фруд в сечението непосредствено преди фронта на скока (стесненото сечение), също и подходните условия. Именно тези условия следва да бъдат отчетени при анализа на ерозионните процеси при съоръжения, функциониращи при ниски напори.

2. Анализът на флукуацията на хидродинамичното налягане в придънната зона сочи наличие на зони с повишена амплитуда на колебанията, разположени на известно разстояние след съоръжението. Това е резултат от реструктурирането на течението, което е в пряка зависимост от положението на долното водно ниво и съответния режим на свързване на нивата (оформяне на повърхнинен, дънен валеж или скок вълна).

3. Влиянието на едрината и зърнометричния състав на дънния материал е отчетено въз основа на три подбрани породи несвързан материал от едър пясък, фин нееднороден и фин еднороден чакъл. С увеличение на характеристикния диаметър на дънния материал (в случая е приет d_{50}) се редуцират дълбочината и мащабът на ямата. Получените максимални дълбочини при сериите с фин нееднороден чакъл с $d_{50} = 4,3$ mm са с около 40% по-малки от тези в среда от пясък с $d_{50} = 1$ mm. Тестовите, извършени в среда от фин еднороден чакъл, дават максимални дълбочини от порядъка на получените при опитите с нееднороден фин чакъл (приблизително 3 до 18% по-малки), въпреки по-големия среден диаметър $d_{50} = 5$ mm.

4. Профилите на ерозионната яма получени при отделните серии, не се характеризират със значителни отклонения и може да се счита, че са подобни. Това подобие, потвърдено и от наблюдения на други автори (Laurson 1952, Ahmad 1963, Altinbilek & Basmaci 1973, Rajaratnam 1981), позволява при известни стойности на максималната дълбочина на изравяне да бъде получен профилът на ямата при достигане на равновесно състояние.

5. Положението на максималната/равновесна дълбочина на ямата в настоящото изследване варира от 14 до 20% L_s . Формираната дюна след нея има размери, зависещи

от обема изнесен материал, а подветреният откос е с наклон, равен на наклона на естествено откосиране на съответния седиментен материал.

6. Геометричните параметри на съоръженията са анализирани въз основа на три типа прагове с еднаква височина по отношение на дъното в долния участък и различен наклон – 1:1, 1:2 и 1:5. Установени са определени тенденции и зависимости, запазващи се при отделните серии с различен седимент. Максималните дълбочини за трите породи дънен материал са получени след моделните тела с наклон 1:1. С редуциране на наклона мащабите на ямата също намаляват, което е резултат от изместване на скока по-нагоре по течението. При съоръженията с моделните тела с най-малък наклон (1:5) и високо долно ниво скокът се формира в зоната на съоръжението и респективно макротурбулентните форми в началото на деформируемото дъно са редуцирани.

7. За получаване на по-подробна информация относно структурата на течението в ерозионната яма след достигане на квазиравновесно състояние следва да бъдат извършени допълнителни изследвания върху преструктурираното поле на скоростите и наляганията в развитата яма. Това може да се осъществи чрез допълнителни моделни изследвания върху модел с недеформируемо дъно, оформено по контура на получените в настоящото изследване ями.

8. Наличието на вторични структури на течението в напречна посока обуславят тридименсионалния му характер. Оттук може да се заключи, че съществува необходимост от провеждане на аналогично изследване върху пространствен модел.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Adduce, C. & La Rocca, M.* Local scouring due to turbulent water jets downstream of a trapezoidal, 2006.
2. *Borman N.E. & Julien P.Y.* Scour Downstream of Grade Control Structures, 1991.
3. *Comiti, F., Andreoli, A., Lenzi, M.* Dimensions of Scour Holes and Effectiveness of Grade-Control, 2001.
4. *Eggenberger, W.* Kolkbildung bei Überfall und Unterströmen, 1943.
5. *Kobus, Helmut.* Hydraulic Modelling, 1980.
6. *Hager, W. H.* Energy dissipator and hydraulic jump. Dordrecht, 1992.
7. *Hoffmans, G.J.C.M. & Verheij, H.J.* Scour Manual, 1997.
8. *Lenzi, M., Marion, A., Comiti, F. & Gaudio, R.* Local scouring in low and high gradient streams at bed sills, 2002.
9. *Lu, Hong, Chang, Lu.* Evolution of scouring process downstream of grade-control, 2012.
10. *Mason, P. J. & Arumugam, K.* Free jet scour below dams and flip buckets, 1985.
11. *Miedema, S.* Dredging Processes – Lecture notes. Chapter 5, 2012.
11. *Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., Reeve, D. E.* Hydraulic Modeling – An Introduction. Spon Press. London & New York 2011.
12. *Peterka, A. J.* Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Denver, Colorado, 1984.
13. *Uchida, T. & Fukoka, S.* Numerical Simulation of Local Scour Process due to Submerged Jet.
14. *Whittaker J. & Schleiss A.* Scour Related to Energy Dissipators for High Head Structures, 1984.

Постъпила: април 2015 г.

STUDY OF LOCAL SCOUR PARAMETERS AT LOW HEAD HYDRAULIC STRUCTURES

P. Todorov¹, N. Lissev², V. Kukurin³, S. Tachev⁴

Keywords: local scour, physical hydraulic modelling, low head hydraulic structures

Research area: engineering hydrology, hydraulics and water management

ABSTRACT

The paper presents results from a physical model study of local scour phenomena after low head hydraulic structures, performed at a hydraulic model of general type. Sloping model bodies with different slopes, corresponding to typical ramp-type drops with an unprotected tailrace section are considered. Two groups of test series are performed – with fixed and movable bed. The first one provides data for the kinematic and hydrodynamic characteristics of the flow for the three basic hydraulic schemes. Based on the records of instantaneous bottom pressures and horizontal flow velocity vectors, the statistical parameters describing the corresponding phenomena are calculated. The mobile bed tests are performed by applying three different types of granular material. The geometry of the scour hole, formed under the same conditions as for the fixed bed test series, is measured. A correlation between the areas of increased turbulence intensity after the structure and the shape and location of the scour hole is sought. The observed trends are analyzed and compared with literature data and results from other similar studies.

¹ Petar Todorov, Eng., Dept. “Hydraulics and Hydrology”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: peter_v@gyuvetch.bg

² Nikolay Lissev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Hydraulics and Hydrology”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: lisev_fhe@uacg.acad.bg

³ Vladimir Kukurin, Senior Assist. Eng., Dept. “Hydraulics and Hydrology”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: v_kukurin@yahoo.com

⁴ Sava Tachev, Chief Assist. Dr. Eng., Dept. “Hydraulics and Hydrology”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: sava371@abv.bg

