



*Приета: 18.03.2016 г.
Преработена: 11.04.2016 г.
Одобрена: 22.04.2016 г.*

КОМБИНИРАНО ХИДРАВЛИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА ДЪННА РАМПА С КОСО РАЗПОЛОЖЕНИЕ

П. Тодоров¹

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

РЕЗЮМЕ

Настоящото изследване разглежда параметрите на ерозионната яма, формираща се в зоната на прехода на нисконапорно хидротехническо съоръжение през речно корито с алувиални отложения от несвързан тип, при приложение на комбинирано (хибридно) физическо и числено моделиране. Съоръжението, обект на разработката, представлява новоизградено защитно съоръжение от тип дънна рампа, чиято основна функция е стабилизиране на речното дъно в зоната на преход на транзитния газопровод за Гърция през р. Струма в долното ѝ течение. Изпълнението на физическия модел и изготвянето на експерименталната програма се основават на подробни натурни данни за актуалната геоложка и топографска картина в зоната на рампата. Ерозионните процеси след съоръжението са моделирани посредством приложение на несвързан материал с ниска относителна плътност, а подборът на мащабните числа е извършен въз основа на обстоен литературен обзор и анализ на утвърдени методики.

Получените по експериментален път резултати за положението и мащабите на ерозионната яма са сравнени с данни от числен хидравличен модел, изготвен специално за целите на изследването в два последователни етапа – еднодименционално моделиране, с цел установяване на съответните гранични условия и двудименционално, предоставящо подробна информация за усреднените по дълбочина хидродинамични и кинематични параметри на течението. В заключение са представени обобщени изводи относно възможностите за приложение на чисто хидродинамичния модел за анализ на морфоложките процеси в зоната на нисконапорни ХТС.

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

1. Въведение

Обект на изследване е защитно съоръжение от тип каменнонасипна дънна рампа, целящо стабилизиране на речното дъно в зоната на преход на транзитния газопровод за Гърция, в долното течение на р. Струма. Потенциална опасност за основното съоръжение – газопровода, представлява значителният ерозионен потенциал на речното течение и относително ниската противоерозионна способност на речното дъно и покритието на газопровода, съставени от едрозърнести пясъци, дребни, средни и едри чакъли, слабо заглинени. Като утежняващ фактор следва да се отбележи още значителната косота на прехода по отношение на основното течение (43°). Установени са още компрометиране на разположения на приблизително 150 m надолу по течението праг и силно изразена тенденция към изместване на речното корито по посока на десния бряг, съпътствана от интензивна брегова ерозия.

Към момента на изследването, новоизграденото защитно съоръжение неколккратно е подлагано на въздействието на високи води. Основен проблем за безаварийното му функциониране представляват деформациите на дъното от общ и локален характер. За прогнозиране на тези деформации е възприет комбиниран подход, включващ физическо и числено моделиране. Физическият модел е изпълнен в условия на подвижно дъно и при приложение на несвързан материал с относителна плътност от 1,3. Подборът на подходящ материал и зърнометрия са извършени след обстоен литературен обзор, оценка на утвърдени изследователски методики и предварителни тестове, за установяване на основните предимства и недостатъци на най-подходящите и достъпни продукти.

Възможностите за прогнозиране на морфоложките процеси в зоната на съоръжения от разглеждания тип, чрез приложение на двудименсионалния числен чисто хидродинамичен модел SRH-2D, са изследвани въз основа сравнение на получените резултати за геометрията на ерозионната яма от физическия модел и изчислените скоростно поле и разпределение на усреднените по дълбочина тангенциални напрежения. Като следващ етап е предвидено провеждане на натурно обследване и замерване на формираната батиметрия, данните от което да бъдат използвани за оценка на възприетия изследователски подход и калибриране на числените модели.

2. Прототип

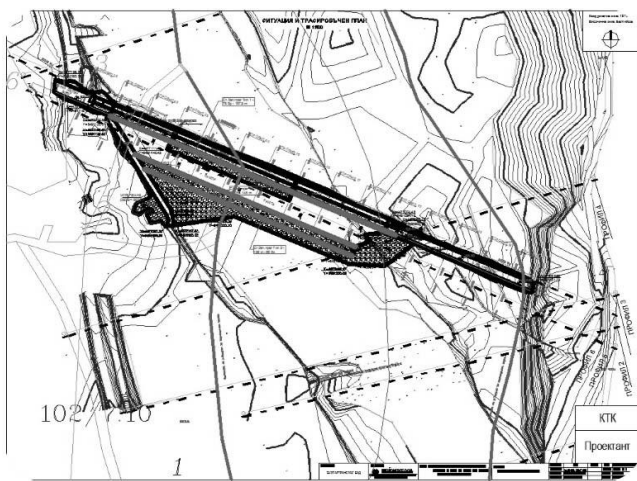


Фиг. 1. Географско разположение на изследваното съоръжение

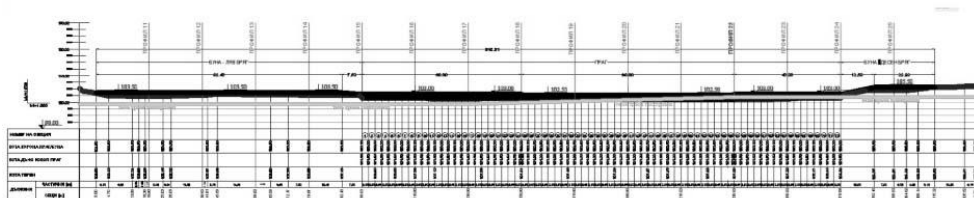
Съоръжението, възприето като прототип за настоящото хидравлично изследване, представлява каменнонасипна дънна рампа, изградена при прехода на Транзитния газо-

провод за Гърция през р. Струма на ПК 990+00 (с. Вълково). Ситуационно рампата е разположена в права, непосредствено след прехода на Транзитния газопровод за Гърция. Същата е изградена успоредно на оста на газопровода, при което, поради значителната косота на прехода (приблизително 43° спрямо оста на основното речно корито), достига дължина от 180 m. В хода на проектирането е разгледан и вариант с нормално разположение на защитния праг, но хидравличните изчисления сочат, че откъм десния бряг на реката се формират условия за значителна ерозия, непосредствено след трасето на газопровода, което създава реален риск за неговото компрометиране.

В конструктивно отношение рампата се състои от 3 бетонови прага и заскалявка между тях, при което ясно се обособяват переходна рампа, гасителен басейн и рисберма. Праговете са с размери – ширина 0,8 m и височина 1,5 m (Тип 1), а най-долният е висок 2 m (Тип 2), като същите са монтирани посредством кран върху добре уплътнена и подравнена основа. Между тях е изпълнена заскалявка от едри скални късове с маса 500 – 1500 kg. Наклонът на заскалявката не превишава 1:10. Под заскалявката е положен обратен филтър от камък с тегло на отделните късове 20 – 100 kg. След най-долния праг е изпълнена рисберма, с дължина не по-малка от 5 m, от същия скален материал. Непосредствено пред първия праг е изградена стоманобетонна плоча със зъб, при дебелина на плочата 20 cm и ширина 3,5 m, в участък с дължина 200 m, върху подложка от речна баластра. Нивото на плочата съответства на кота било–праг, като същата е продължена и по откоса на двете странични буни. Изпълнена е хоризонтална площадка от взаимстващ речен материал с ширина 3,5 m, която да се използва по време на строителството за придвижване на механизацията.

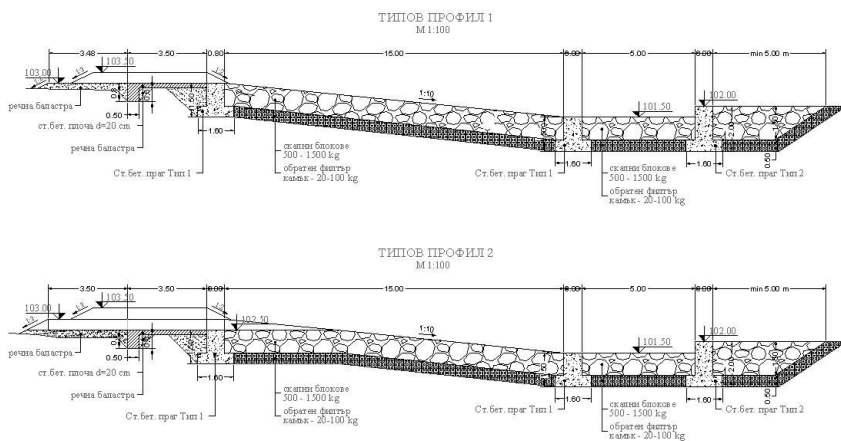


Фиг. 2. Ситуация на защитното съоръжение



Фиг. 3. Надлъжен профил по оста на защитното съоръжение

Билото на рампата е изпълнено на две нива, при което в зоната на основното речно корито се оформя участък с кота корона 102,50 m а при заливните тераси тази кота е 103,00 m. Това решение цели насочване на водния поток към централната част на речното корито и предотвратяване на евентуално изменение на руслото в план.



Фиг. 4. Типови напречни профили на защитното съоръжение

В бреговата зона, от двете страни на реката, са изпълнени буни, представляващи своеобразно продължение на рампата, с коти на короната, надвишаващи тези на преливния ѝ ръб. Разположената по десния бряг на реката буна достига кота 105,50 m, като ширината на короната ѝ е 7 m. Буната по левия бряг е изпълнена с ширина на короната 5 m и кота на същата 103,50 m. Страничните откоси са с наклон, не по-малък от 1:2.



Фиг. 5. Прототип след приключване на стротелните работи (десен бряг)

3. Физически модел

Изборът на материал с определени показатели е критичен момент при провеждане на изследвания в условия на подвижно дъно, тъй като поведението на същия определя в голяма степен подбора на мащабните числа. Същевременно постигането на съответствие между силите, пораждащи движението на дънните частици в натура и модел, е трудно постижимо. Това налага прилагането на деформация на модела, състояща се обичайно в промяна на един от геометричните мащаби, увеличаване на надлъжния наклон, комбинация от двата подхода или промяна в мащабните числа, обвързващи скоростта и водното количество за модел и натура [Ettema, 2000]. Тъй като гореописаните варианти за деформация на модела биха повлияли в значителна степен върху характеристиките на

течението, то анализът на резултатите следва да бъде извършен критично и с особено внимание [Franco, 1978, стр. 9].

Конвенционалните материали, използвани за моделиране на алувиални отложения са пясък (кварцов) и трошени въглища. В различни изследователски лаборатории са извършвани тестове с материали като пемза, керамзит, бакелит, дървени трици, черупки от орех и различни полимерни материали [Franco, 1978, стр. 9], [Ettmer, 2007] и [Ettema, 2000]. По отношение на зърнометричния състав следва да се отбележи, че пълното съответствие между модел и натура е постижимо единствено при геометрично мащабно число ≈ 1 , което не е налице в случай на дребно и средномащабен модел [Novak et al., 2011], [Kobus, 1980]. Моделиране на относително едрозърнест материал е по-лесно постижимо, но съществува възможност за несъответствие в преобладаващата форма на транспорт (влачени или плаващи наноси) за модел и натура. Дребнозърнестите материали със съдържание на пясъчни частици предполагат образуването на дънни форми (рифели), чиито мащаби зависят от зърноемтрията на материала, скоростта на течението и температурата на водата. Формираните в моделни условия рифели могат да съответстват на дънни форми със значителни размери върху прототип, което не отговаря на действителността. При по-едрите фракции се наблюдава формиране на пясъчни коси и дюни, придвижващи се надолу по течението. Освен това тази категория материали изискват по-големи влачещи сили за задвижването им, поради което имат влияние освен върху дънните форми и върху мащабите на скоростите и наклона [Franco, 1978, стр. 11].

Обстоен анализ и оценка на приложението на различни видове материали за симулиране на морфоложките процеси върху физически модели е представен във [Franco, 1978]. Някои от по-съществените особености са обобщени в следната таблица:

Материал	Относителна плътност	Предимства +	Недостатъци –
пясък	2,65	достъпен, евтин, химически пасивен, недеформируем, приложимост под атмосферни влияния	необходимост от деформиране на модела, формиране на рифели
въглища	1,3	ниска относителна плътност, малка вероятност за формиране на рифели	неприложим за модели под атмосферно влияние (на открито)
полимери	1 – 1,6	моделируема относителна плътност, форма и размери на зърната	хидрофобни свойства, задържане на газови мехурчета и увеличена плаваемост, висока цена
керамзит	1 – 1,3	ниска относителна плътност и цена	неравномерна плътност и плаваемост на част от материала
орехови черупки	1,3	ниска относителна плътност и цена	промяна на механичните показатели с течение на експеримента, оцветяване на флуида, отделяне на газова фаза и миризма, формиране на рифели
бакелит	1,3 – 2,5	приемлива относителна плътност	необходимост от значителна деформация на модела

Мащабиране на модела

Критичен анализ на някои от по-популярните методи за мащабиране на модели с подвижно дъно е представен в [de Vries, 1993]. Описаните методики представляват продукт на опита на четири от най-елитните хидравлични лаборатории, между които лабораторията към Университета на Калифорния, Бъркли (University of California, Berkeley, USA), лабораторията на Делфт, Холандия (Delft Hydraulics, the Netherlands), лабораторията на Уелингфорд, Великобритания (HR Wallingford, UK) и Националната хидравлична лаборатория в Шато, Франция (Laboratoire national d'hydraulique, Chatou, France) [Nicollet, 1989]. Освен горепосочените практики, за целите на настоящото изследване е разгледана възприетата от Корпуса на военните инженери на САЩ (U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station) такава [Franco, 1978]. Отчитайки предходния опит в областта, литературния анализ и предварителните изследвания, като най-подходяща за целите на изследването е приета методиката, прилагана от лабораторията на Делфт, Холандия, при която се прибягва до непълно съответствие на хидравличните наклони и съответно геометрична деформация на модела.

Изборът на мащабни числа е извършен при придържане към горепосочената методика и се състои от два етапа. Първоначално е дефиниран минималният допустим геометричен мащаб, осигуряващ работа в зоната на автомоделност, при предпоставка за хидродинамичен модел с неподвижно дъно. Този анализ е извършен от чисто практически съображения и служи за ориентир по отношение на капацитета на хидравличната лаборатория и постижимата степен на геометрична деформация. Същата е сравнена с препоръчителните по литературни данни стойности [Kobus, 1980]. Във втория етап са определени мащабни числа за геометрично деформирания модел в условия на подвижно дъно при преобладаващ транспорт на влачени наноси.

При моделиране на хидротехнически съоръжения при открити течения следва да бъдат спазени условията за хидравлично подобие на гравитационните сили, обуславящи течения със свободна водна повърхност. За такива съоръжения и формиращите се в тях течения меродавен критерий на подобие се явява критерият на Reech–Froude, записан във вида: $Fr = v^2/gh$, където Fr е число на Фруд според българоезична/руска литература [–]; v – средна скорост на течението [m/s]; g – земно ускорение [m/s²] и h – характерна дълбочина на течението [m]. Критерият на подобие се дава във вида [Carlier, 1979] $Fr_{pr} = Fr_m = v_{pr}^2 / gh_{pr} = v_m^2 / gh_m$, където индексите m и pr се отнасят съответно за модел и натура.

За геометрично недеформиран хидравличен модел е необходимо осигуряване на съответствие между хидравличния наклон J за натура и модел: $J=idem$. При подготовката на физическия модел е извършен анализ при възприет основен критерий за подобие на Рийч–Фруд и е направена оценка на допустимия минимален геометричен мащаб, при който влиянието на вискозните сили може да се счита за пренебрежимо. Анализът е базиран на литературни данни за препоръчителни лимитиращи стойности на числото на Рейнолдс Re^{lim} за модел и съответно поддържане на адекватен хидравличен режим в двете системи, т.е. придържане към автомоделната хидравлична област за характерни водни количества – в случая $Q_{5\%}$ [Киселев, 1972], [Ляхтер и Прудовский, 1984]. При възприет диапазон за минималната стойност на Re^{lim} в интервала $2,5 \times 10^4$ до 3×10^4 [Киселев, 1972], за минималния геометричен мащаб се получава стойност от 1:63

(модел:натура). Отчитайки наличното в хидравличната лаборатория пространство, изпълнението на модел в мащаб по-едър от 1:100 е непостижимо. Следователно е необходимо да се прибегне към деформация на модела и подбор на различни мащабни числа за вертикалните и хоризонталните линейни размери.

Окончателният подбор на мащабни числа е извършен при предпоставката за подвижно дъно и преобладаващ транспорт на влачени наноси, при което основните критерии за подобие са модифицираното число на Фруд (параметър на Шийлдс), модифицираното число на Рейнолдс, отношението на специфичната плътност и зърнометрията на материала от подвижното дъно. Приложена е методиката на Delft Hydraulics, описана подробно в [de Vries, 1993]. При предпоставката за моделен материал с относителна плътност 1,3 и налична зърнометрия в диапазона 1 до 5 mm, се получават следните мащабни числа: $M_{\Delta\rho} = (\rho_{s,p}/\rho) / (\rho_{s,m}/\rho) = 2$ – мащабно число за относителната плътност на седимента, $M_d = d_p/d_m = 0,6 \div 3$ – мащабно число за характеристичен диаметър на зърната. Т.е. едно от мащабните числа е дефинирано, а друго попада в определени крайни граници. Мащабът на хоризонталните линейни размери също е предварително приет с оглед ограниченията на хидравличната лаборатория – $M_L = 100$.

За модифицираното число на Рейнолдс се получава: $Re_* = d_{90} u_* / \nu \approx 400$. Тъй като $Re_* > 60$, то може да се счита, че влиянието на вискозните сили може да бъде пренебрегнато [Kobus, 1980]. От тук следва, че са налице две критериялни условия, от които да бъдат прецизирани останалите две мащабни числа – мащабът на вертикалните размери M_h и на зърнометрията на материала M_d . И тъй като са налице определени ограничения и в подбора на M_d , то вертикалният мащаб следва да бъде получен от критерия на Шийлдс, при възприемане на минимален постижим размер на моделния материал – 1 mm, или $M_d = 3$.

От условието $Fr^* = \theta / \theta_{cr} = M_h^2 / (M_L M_d M_{\Delta\rho}) = 1$, за M_h се получава стойност от 25, което дава степен на геометрична деформация от $k_d = 4$. За останалите основни физически величини са получени следните мащабни числа:

Символ	Стойност	Описание
M_L	100	мащабно число на хоризонталните размери
M_h	25	мащабно число на вертикалните размери
M_d	3	мащабно число на характеристичния диаметър на дънния материал
M_v	5	мащабно число за скоростите
M_t	40	мащабно число за време
M_a	0,25	мащабно число за ускорения
M_Q	12500	мащабно число за водните количества
M_F	62500	мащабно число за сила
M_p	25	мащабно число за налягане при $Mr = 1$
M_{Re}	125	мащабно число за числото на Рейнолдс

Опитна постановка

Физическият модел е изпълнен в Централната научно-изследователска лаборатория за хидравлични изследвания (ЦНИЛХИ) при УАСГ. Подходяният участък, т.е. зоната над рампата, е изпълнена като недеформируема повърхност. Тестовият участък е фиксиран непосредствено след съоръжението и е с обща дължина 2 m. Мощността на пласта несвързан дънен материал е 15 cm. Схема на опитната постановка е представена на следната фигура.



Фиг. 6. Опитна постановка и тестов участък

Експерименталната част включва детайлно геометрично измерване на формираната ерозионна яма след съоръжението, измерване на разпределението на налягането в придънната зона и на скоростното поле в тестовия участък след достигане на квазиравновесно състояние. Тестовите са извършени при фиксирано водно количество, съответстващо на определената в отделен хидроложки анализ висока вълна с обезпеченост 5%. След приключване на експерименталната програма е извършена статистическа обработка на получените записи на изменение на хидродинамичните и кинематични параметри и са установени някои закономерности, обвързващи горепосочените показатели с положението, формата и мащаба на ерозионната яма.

Измервателна апаратура

Към представляващите интерес в настоящото изследване величини спадат водни нива/пиезометричната линия и респективно дълбочините, хидродинамичните налягания в придънната зона, локалните скорости и геометрията на ерозионната яма. Дълбочината на течението и профилът на формиралата се ерозионна яма са измерени посредством нивомерна игла. Прецизността на измерването на водните нива е 1 mm, а на ямата 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.

Моментните стойности на скоростите на течението в хоризонталната равнина X-Y са измерени посредством SonTek/YSI 16-MHz MicroADV (Acoustic Doppler Velocimeter)

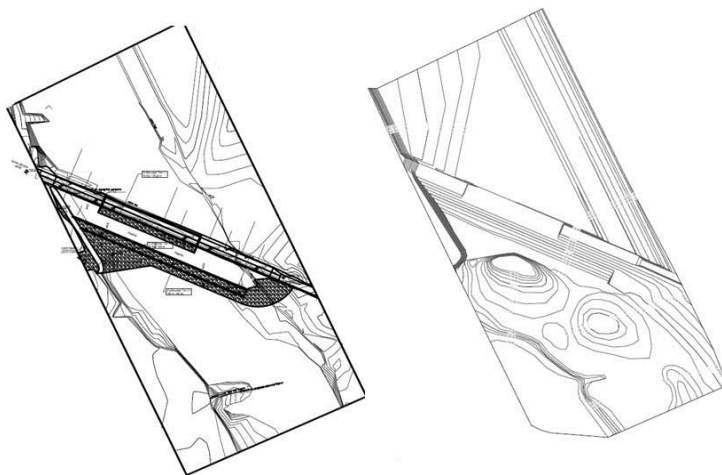
– Акустичен доплеров скоростомер (велосиметър) с двуменционална сонда. Работният диапазон на сондата е от 1 mm/s до 2,5 m/s.

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 – физически модел

В резултат на проведените физически моделни изследвания е изготвена топографията в зоната след съоръжението след достигане на квазиравновесно състояние. Като критерий за определяне на положението, в което се счита, че е достигнато равновесие, е възприет подходът на Delft Hydraulics. В настоящия случай такава е постигната след 4 часа за модел. Изследването е извършено в условия на стационарен режим. Водното количество съответства на 20-годишна висока вълна за съответния створ, като същото е получено след статистическа обработка на редицата от годишни максимуми. На следната фигура е представена формираната след приключване на изследването топография в зоната на рампата. Измерването е извършено посредством фотограметричен анализ.

Максималната дълбочина на ерозионната яма е получена в зоната непосредствено след рисбермата в централната част, срещу основната преливаема част на съоръжението. Изравяне е получено в още два участъка надолу по течението, с по-малки размери, както и обрушване в бреговите зони, породено от пространствения характер на течението. Максималната стойност на понижението на дъното достига 1,8 m в натура. Така получената картина по отношение на топографията на речното дъно е сравнена с получените по числен път разпределения на усреднените по дълбочина тангенциални напрежения и скорости.



Фиг. 7. Топография натура (ляво) и модел (дясно)

5. Числено моделиране

Численото моделно изследване е проведено в два етапа. Първоначално е разгледан еднодименсионален модел, с помощта на който са установени котите на свободната водна повърхност по дължина на речния участък за характерни водни количества.

Използван е численият модел HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) версия 4.1, разработен от корпуса на военните инженери на САЩ (US Army Corps of Engineers). С получените усреднени по сечение стойности се преминава към втория етап от изследването, който цели детайлизиране на хидравличната картина в зоната на газопровода и защитното съоръжение. Разпределението на средните по дълбочина скорости и тангенциални напрежения са получени във втория етап на изследването, с помощта на двуменсионален модел SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics – Two Dimensional Model), разработен от US Bureau of Reclamation.

Хидравлични изчисления с 1-D модел

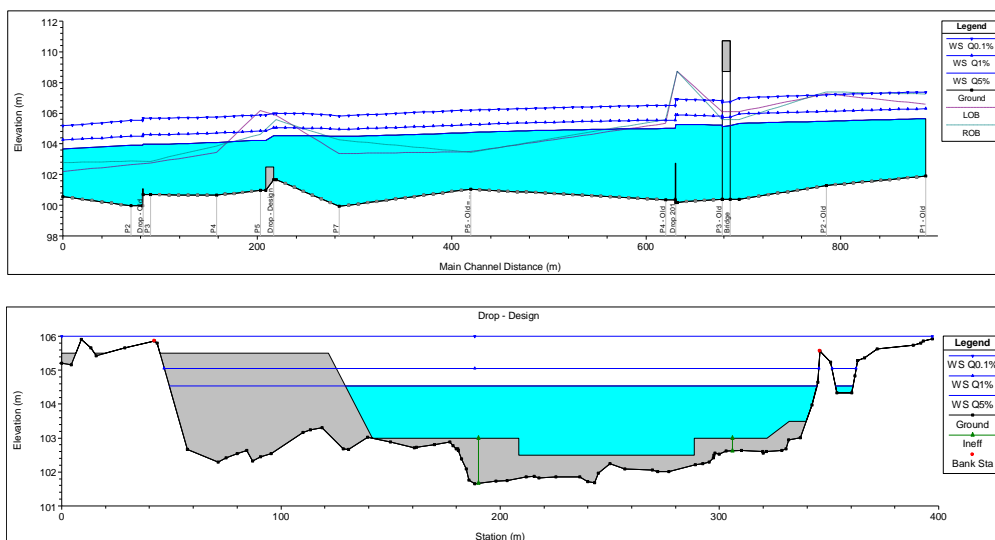
С помощта на едноразмерния числен модел са установени кривите на свободната водна повърхност за характерни водни количества, определени в хидроложкия доклад. За целта е използван численият модел HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) версия 4.1, разработен от корпуса на военните инженери на САЩ (US Army Corps of Engineers).

Геометричните граници на модела обхващат участък от реката с дължина 970 m. При построяването му са въведени дванадесет напречни сечения в характерни профили по дължина на речното корито (фиг. 7). За да се минимизира влиянието на двете крайни гранични условия, в него са включени още разположените нагоре по течението бетонов дънен праг и мостовото съоръжение при km 0+600 от общински път BLG1243/I-1, Кресна – Сандански. Моделиран е също така и разрушеният дънен праг 130 m надолу по течението, съответстващ на състоянието към момента на изследването. Всички съоръжения са въведени в модела след подробно актуално геодезическо заснемане.



Фиг. 7. Разположение на изчислителните профили в план (върху сателитно изображение от Google Earth)

Поради относително голямото разстояние между профилите (изключение правят тези непосредствено преди и след съоръженията), с цел прецизиране на водните нива, в модела са въведени допълнителни междинни профили, които не са илюстрирани на фиг. 7. Като окончателен резултат са получени кривите на свободната водна повърхност по дължина на реката за характерни максимални водни количества. Получените криви на свободната водна повърхност са представени на фиг. 8. На същата фигура са илюстрирани водните нива в профила на дънната рампа.

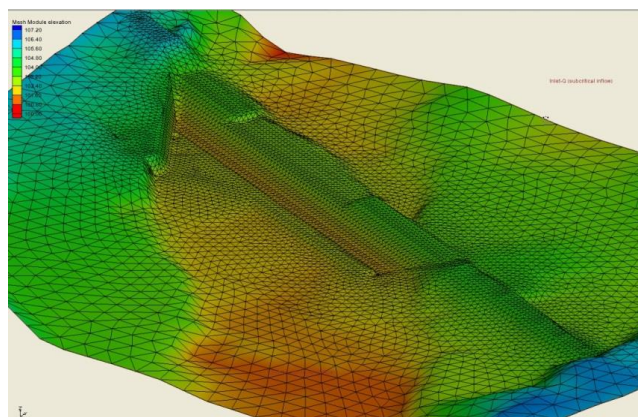


Фиг. 8. Надлъжен профил ос река (горе) и напречен профил ос защитно съоръжение (долу) при преминаване на характерни максимални водни количества

Хидравлични изчисления с 2-D модел

За целите на изследването е използван двумерният модел SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics – Two Dimensional Model), позволяващ зонизирано моделиране, т.е. моделиране на основен и странични канали и заливни тераси, като всяка зона се задава със собствени параметри – коефициент на грапавина, максимален размер на клетката, вид клетка и др. Обикновено тези зони се определят въз основа на естествените параметри на речната система като топография, растителност и др.

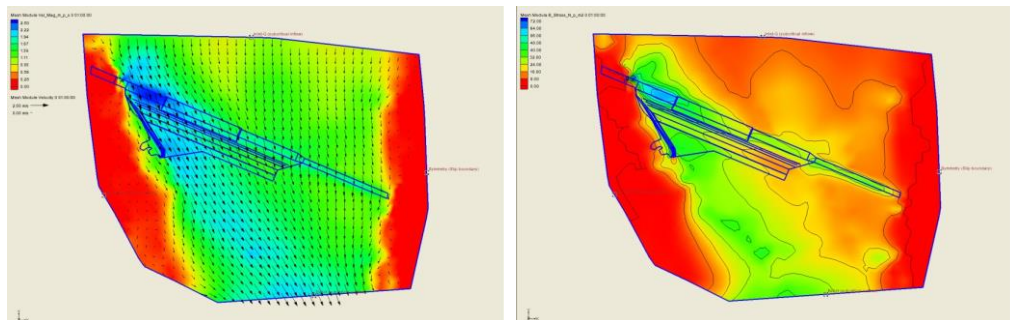
Разглежданият модел обхваща участък от реката с дължина приблизително 275 m. За дефиниране на граничните повърхности е използван численият модел на терена. Възприета е конвенционална изчислителна мрежа от триъгълни елементи с минимален размер на клетката 2 m и максимален – 10 m.



Фиг. 9. Изчислителна мрежа – 2D-модел

Граничните условия са зададени в съответствие с резултатите от еднодименсионалния модел. Условията в горния участък са дефинирани посредством водното количество и съответното водно ниво, получени от модела HEC-RAS. По същия начин е зададено и долното гранично условие. Възприети са същото разпределение на коефициентите на грапавина, както при еднодименсионалния модел.

Изчисленото скоростно поле при пропускане на водно количество с обезпеченост 5% ($673 \text{ m}^3/\text{s}$) и съответните тангенциални напрежения са представени на фиг. 10.



Фиг. 10. Скоростно поле и вектори на скоростта (ляво) и разпределение на тангенциалните напрежения при преминаване на високи води с обезпеченост 5% ($673 \text{ m}^3/\text{s}$)

Сравнението на експерименталните резултати и получените по числен път зони на екстремни тангенциални напрежения сочат известни разлики в качествен план. За това допринася двудименсионалният характер на числения модел и прилагането на деформация на физическия. Очевидна е разликата в токовите линии и разпределението на скоростните вектори в зоната след съоръжението.

Въпреки поддържането на еднакви гранични условия при двата модела, не бе възможно постигане на сходство в скоростните полета и дънната топография. Това сочи, че в хода на развитие на ерозионните процеси се получава изменение и в скоростното поле и разпределението на тангенциалните напрежения, които не могат да бъдат отчетени от избрания числен модел. От тук може да се заключи, че приложението на 2-D числен хидравличен модел от възприетия тип за решаване на морфоложки проблеми трябва да се извършва с внимание, а резултатите да бъдат критично анализирани. Необходими са данни от натурния обект за преминавали максимални води и формираната топография.

6. Заключение

Сравнителният анализ на резултатите от двата модела сочи известно разминаване в зоните на отлагане и изравяне и съответните изчислени разпределения на усреднените по дълбочина тангенциални напрежения и скоростни вектори. Същото следва да намери своето обяснение в невъзможността за отчитане на изменението в хидродинамичната картина, породено от вариация на батиметрията, при наличие на деформируемо дъно от една страна и с характеристиките на съоръжението, формирането на пространствени вихри и проявата на мащабни ефекти вследствие деформацията на модела, от друга. Реална оценка на тежестта на всеки от горепосочените фактори може да се извърши едва след набиране на натурни данни и непосредствени наблюдения върху прототипния обект.

Получените вследствие експеримента резултати, в комбинация с натурните измервания, биха спомогнали за доразвиване на практическите подходи за моделиране на морфоложки процеси в лабораторни условия, върху модели в умален мащаб.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-69/2014 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Carlier, M.* *Hydraulique generale et appliquee.* Paris, 1979.
2. *de Vries, M.* *Use of Models for River Problems.* Paris: UNESCO Publishing, 1993.
3. *Ettema, R.* *Hydraulic Modeling Concepts and Practice.* ASCE (American Society of Civil Engineers), 2000.
4. *Ettmer, B.* *Physikalische Modellierung von Kolkprozessen.* Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 90, 2007.
5. *Kobus, Helmut.* *Hydraulic Modelling,* 1980.
6. *Nicollet, G.* *Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling, River Models.* (R. Martins, Ред.) Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers in cooperation with NATO ASI Series, 1989.
7. *Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., Reeve, D.* *Hydraulic Modeling – An Introduction. Principles, Methods and Applications.* Taylor & Francis e-Library, 2011.
8. *Киселев, П. Г.* *Справочник по гидравлическим расчетам.* Москва, Энергия, 1972.
9. *Лятхер, В. М., Прудовский, А. М.* *Гидравлическое моделирование.* Москва, Энергоатомиздат, 1984.

COMBINED HYDRAULIC MODELLING OF AN OBLIQUE SLOPING RIPRAP DROP STRUCTURE

P. Todorov¹

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

ABSTRACT

A study of the scour hole parameters in the area of the crossing of a low head grade control structure through an alluvial stream, by adopting combined (hybrid) physical and numerical hydraulic modelling, is carried out. Subject of the study is a newly constructed drop structure of the type - sloping riprap grade control structure. The main purpose of the structure is the stabilization of the river bed in the area of the transit gas-main crossing in the lower course of the Struma river. The performance of the physical model as well as the preparation of the experimental programme are based on detailed prototype data regarding the actual geological and topographic conditions in the area of the newly designed structure. The scour phenomena downstream from the ramp are modelled with application of non-cohesive granular material with low relative density. The scaling of the model is performed after detailed literature review and analysis of common practices.

The experimentally obtained results of the location and geometry of the scour hole are compared with the data for the distribution of the depth averaged velocities and shear stresses, product of specially developed numerical model. The latter is carried out in two steps – one-dimensional modelling for estimation of boundary conditions, required for the second step – two dimensional hydrodynamic modelling. In conclusion, a summary of the main results and analyses of the applicability of the entirely hydrodynamic numerical model for predicting the fluvial processes is presented.

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