

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

ХИДРАВЛИЧНО МОДЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРЕЛИВНИТЕ СЪОРЪЖЕНИЯ НА ЯЗОВИР „ЛУДА ЯНА“

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

Ключови думи: язовир, хидравлично моделиране, облекчителни съоръжения, високи води, преливник

Научна област: инженерна хидрология, хидравлика и водно стопанство

РЕЗЮМЕ

Язовир „Луда Яна“ е предназначен да осигури постоянно водоснабдяване за гр. Панагюрище и редица села и промишлени предприятия в региона, посредством регулиране оттока на река Панагюрска Луда Яна след събирането на притоците Стара река и Мулейска. Земнонаспната конструкция и разположението на водоподпорното съоръжение непосредствено над град Панагюрище обуславят повишените изисквания относно осигуряването на безаварийно провеждане на високите води и минимизиране на ерозионния потенциал на течението в долния участък.

За да бъдат гарантирани хидравличната проводимост на преливните съоръжения и задоволителната работа на енергогасителното съоръжение, беше проведено хидравлично моделно изследване на същите върху физически модел в умален геометричен мащаб 1:40 (модел:натура). В обхвата на изследването попадат челният преливник и подходният участък, преходният участък и бързотокът, енергогасителят и долният участък. В хода на изследването са разгледани алтернативни варианти на енергогасителното съоръжение и долния участък и са изготвени препоръки за окончателните параметри и конфигурация на съоръженията.

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

² Николай Лисев, доц. д-р инж., кат. “Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: lisev_fhe@uacg.acad.bg

³ Владимир Кукурин, инж., 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

1. Въведение

Язовир „Луда Яна“ е разположен на около 3 км североизточно от град Панагюрище. Основна цел на проекта е осигуряване на водни обеми за водоснабдяване на гр. Панагюрище и редица села от общините Панагюрище, Пазарджик и Стрелча, както и на няколко големи промишлени предприятия. Водоемът акумулира и регулира оттока на р. Панагюрска Луда Яна, формирана след обединяването на Стара река и Мулейска река.

Работният проект, въз основа на който е изпълнена една част от съоръженията на водоснабдителната система, е разработен през 1984 г. от ИПП „Водпроект“ – София. Началото на строителните работи е поставено през 1986 г., но през 2000 г. същите са прекратени преди окончателното завършване на обекта, главно поради недостиг на средства.

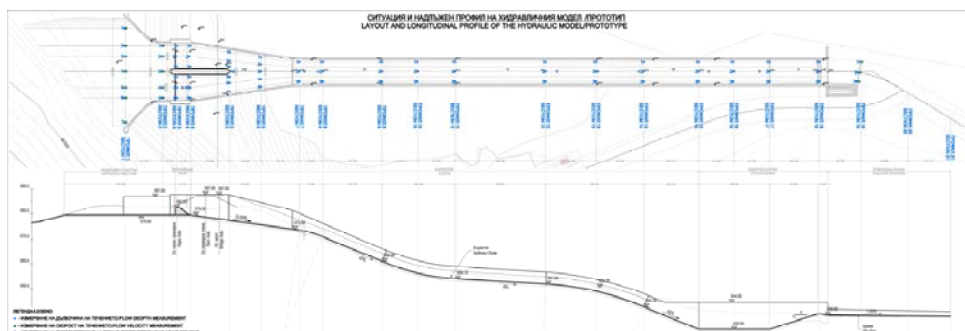
Във връзка с изготвянето на технически проект за язовирната стена и прилежащите хидротехнически съоръжения бяха проведени хидравлични моделни изследвания на съоръженията за отвеждане на високите води. Същите са извършени в ЦНИЛХИ при УАСГ върху физически модел в умален геометричен мащаб. Въз основа на резултатите от хидравличните изследвания и съпътстващия анализ са изготвени препоръки за окончателните параметри и конфигурация на съоръженията.

2. Описание на съоръженията

Стената на язовир „Луда Яна“ е висока 45,3 m, считано от основата на глинено-то ядро. Короната е разположена на кота 587,50 m, а общият обем на водохранилището възлиза на $19,75 \times 10^6 \text{ m}^3$. Физическият модел, върху който е извършено хидравличното изследване, обхваща преливника и подходния участък с част от насипа на стената, и естествения терен, бързотока, енергогасителя, отвеждащия канал и прилежащия терен. Моделирането е извършено при спазване на закона за подобие на Reech-Froude.

Отвеждането на високите води се предвижда да се осигури посредством челен преливник, разположен в левия бряг и попадащ частично в насипа на стената. Подходният участък към преливното тяло представлява хоризонтална площадка на кота 579,5 m с площ приблизително 0,15–0,16 ha. Площадката е ограничена от двете вертикални направляващи бетонни стени на преливника, откосиран изкоп с наклон 1:1 (вертикално:хоризонтално) при левия скат непосредствено пред лявата направляваща стена и прилежащия хоризонтал на кота 579,50 m.

Билото на преливника е фиксирано на кота 582,50 m, т.е. 3,0 m над нивото на подходната площадка ($p = 3,0 \text{ m}$). Профилът на преливното тяло съответства на безвакуумен преливник практически профил, оформен по стандартен WES профил с вертикална фронтална част [8] и оразмерителен напор приблизително 3,1 m. Участъкът пред оста на преливника (минаваща по билото) се състои от съставен криволинеен профил и вертикално чело с височина 2,706 m. Преливният фронт е разделен на две еднакви полета с ширина 10,5 m всяко посредством междинен стълб с ширина 2 m и дължина по посока на течението – 20 m. Челото и тила на стълба са с обтекаема форма, а в долния му край преминава мостова конструкция, осигуряваща връзката с левия бряг.



Фиг. 1. Ситуация и надлъжен профил на съоръженията за отвеждане на високите води с разположение на мерните точки и профили (прототип)

Отвеждането на водите от преливника към долния участък се осъществява посредством облицован бързоток с правоъгълно напречно сечение и дължина 204,75 m. Ситуационно каналът е разположен в права и се състои от стесняващ се непризматичен преходен участък в горния край и призматичен участък с ширина 10,0 m. Нивелетата на бързотока следва приблизително контура на естествения терен, което обуславя наличието на четири секции с надлъжен наклон, вариращ между 6% и 42%, свързани помежду си посредством вертикални криви.

Енергогасителното съоръжение представлява водобоеен кладенец с правоъгълно напречно сечение и ширина равна на тази на бързотока – 10,0 m. Състои се от участък с хоризонтално дъно и дължина 28,50 m на кота 533,50 m и участък с обратен наклон 1:3 (в:х) и дължина 19,50 m, осъществяващ връзката с долния участък (кота 539,50 m). Билото на оградните стени на гасителя е разположено на кота 544,50 m. Участъкът след енергогасителя представлява облицован канал с матраци по дъното и габионни оградни стени, формиращи приблизително трапецовидно напречно сечение. Надлъжният наклон на дъно на долния участък е 1%, а ширината на коригираната секция – 10,0 m.

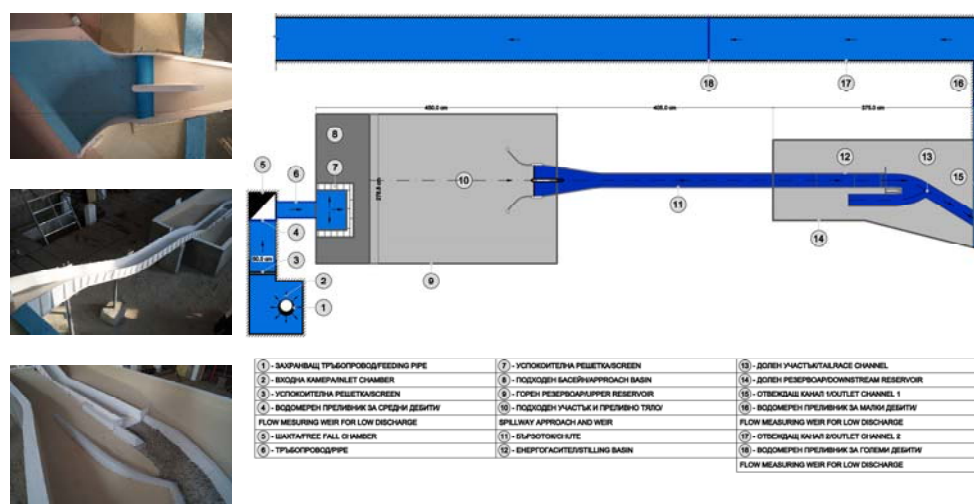
Таблица 1. Оразмерителни водни количества

Обезпеченост	Водно количество	Описание
%	m ³ /s	-
0,10	238	без хидравлично падащи затвори
0,10	316	с хидравлично падащи затвори
0,01	437	без хидравлично падащи затвори
0,01	463	с хидравлично падащи затвори

3. Хидравлично моделно изследване

Оразмерителното водно количество за преливника и бързотока съответства на явление с вероятност за превишение веднъж на 1000 години ($p = 0,1\%$) след ретензия на пика, като е предвидена проверка за явление с вероятност за превишение веднъж на 10 000 години ($p = 0,01\%$) за короната на язовирната стена. Същите са представени в таблица 1 за вариант със и без наличие на хидравлично падащи затвори.

Основните задачи на хидравличното моделно изследване включват [11] – определяне хидравличната проводимост на преливното съоръжение при свободно преливане, експериментално определяне на ключовата крива и респективно установяване на водните нива в езерото за характерни водни количества; установяване на скоростното поле, визуални наблюдения, анализ и оценка на хидравличната картина в подходния участък; установяване структурата на течението, разпределението на дълбочините и пиетометричното налягане по дъното и разпространение на стоящи коси вълни по дължината на бързотока при пропускане на характерни водни количества; оценка на хидравличното действие на бързотока, височината на оградните стени и радиусите на вертикалните криви с оглед избягване на преливане, недопустими вакууметрични налягания и кавитационни явления; установяване на хидравличното действие на енергогасителя при пропускане на характерни водни количества; определяне на водните нива, пиетометричното налягане по дъното на гасителя в характерни профили и разпределение на скоростите по вертикала; установяване на водните нива (дълбочини) и скорости на течението в долния участък и оценка на ерозионния потенциал на течението; анализ и оценка на хидравличното действие на отделните съоръжения и цялостната компоновка и изготвяне на препоръки за неговото подобряване.



Фиг. 2. Схема на опитната постановка

Когато се изследват открити течения като възникващите при преливници, бързотоци, енергогасители и канали, т.е. течения, в които преобладаващи са гравитационните сили, най-често моделирането се извършва при спазване на критерия за динамично подобие на Reech-Froude [3, 6, 10, 12]. Физическият модел на съоръженията за отвеждане на високите води от язовир „Луда Яна“ е изпълнен в мащаб 1:40 (модел:натура). Така възприетият мащаб осигурява развит турбулентен режим в обхвата на моделираните съоръжения при съответните грапабини на обтекаемите повърхности и е по-едър от минималния допустим както за преливника, така и за бързотока [13]. По-

високите моделни грапавини оказват влияние основно върху формираните по дължина на бързотока дълбочини, като експериментално установените такива са с около 9–10% по големи от тези за натура, без отчитане ефекта на аериране и формирането на стоящи коси вълни. Опитната постановка на лабораторния модел е представена на фиг. 2.

Процесите на самоаерация по бързотока и турбуленцията в енергогасителя не могат да се оценят количествено въз основа на моделни данни при избрания геометричен мащаб [6]. Подобна оценка е направена въз основа на литературни данни [13] и анализ на данни от редица аналогични изследвания [4, 9].

4. Резултати

Установените върху физическия модел форми на течението, дълбочини, водни нива, скорости и налягания са изчислени за натура и представени в графичен и табличен вид. Качествена оценка на хидравличното действие на отделните съоръжения и общата им компоновка е направена, като се вземат предвид визуални наблюдения на явленията върху модела [11].

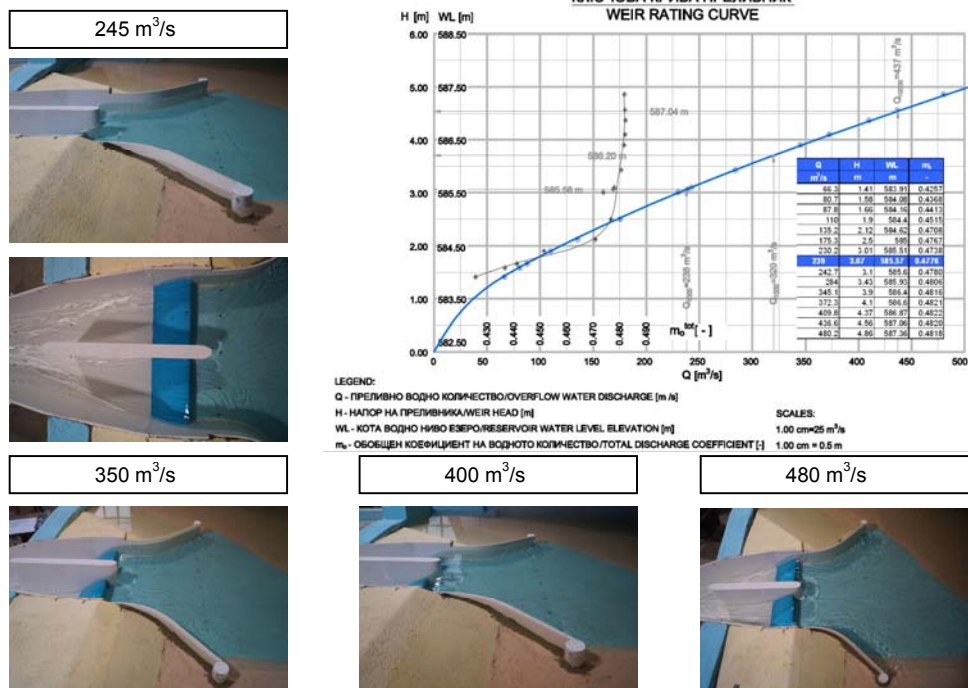
4.1. Подходна площадка, преливно тяло и междинен стълб

Влиянието на подходните условия – подходна хоризонтална площадка, оградни стени и прилежащ терен върху хидравличните параметри на формиращото се течение към преливника е установено чрез измерване на дънните и средните по вертикала скорости в два напречни профила, разположени върху подходната площадка и линиите на водните нива (дълбочините) по протежение на течението на осовата линия на дясното преливно поле от язовирното езеро, през билото на преливника до долния край на междинния стълб.

Проведените тестове сочат равномерно разпределение на скоростите в подходния участък и формиране на спокойно паралелоструйно течение към преливника и за двете характерни водни количества (238 m³/s и 316 m³/s).

Построена е ключовата крива на преливното съоръжение фиг. 3 в диапазона от 66,3 m³/s до 480 m³/s, а участъкът под долната граница е получен чрез плавно продължение на кривата до точка с координати $Q = 0$ m³/s и $H = 0,0$ m ($BH/WL = 582,5$ m). Изчислен е обобщеният коефициент на водното количество m_o по известната зависимост за правоъгълен преливник [2]. На фиг. 3 е представена графичната зависимост между m_o и напора на преливника, респективно водното ниво в езерото. След отчитане на ефекта от контракция при обтичане на междинния стълб и направляващите стени е установен коефициент на водното количество на преливното тяло (редуциран коефициент) при пропускане на оразмерително водно количество $m = 0,485$.

Хидравличната проводимост на преливника позволява безпроблемното отвеждане на високите води. Запасът до короната на язовирната стена при пропускане на водно количество с вероятност за поява веднъж на 1000 години (без хидравлично падащи затвори) е 1,30 m.



Фиг. 3. Ключова крива на преливника

4.2. Бързоток

Разпределението на дълбочините по дължина на бързотока е установено посредством директното им измерване върху модела при пропускане на характерните водни количества. Възприетата измервателна техника осигурява точност от ± 1 mm за модел и респективно ± 40 mm за натура. Мерните профили по дължина на бързотока са общо 11 (профил 5 до профил 15). В напречно направление дълбочините са мерени в три точки – в оста и непосредствено до всяка от оградните стени, като на места, където е налице значителна неравномерност на течението в сечението, са извършени допълнителни измервания.

Ярко изразено неравномерно напречно разпределение на дълбочините и скоростите, респективно водните количества, е налице в значителна част от дължината на бързотока. Относително равномерно напречно разпределение на дълбочините се формира едва след профил 12. Генератор на тази неравномерност, проявяваща се под формата на стоящи коси вълни, са преходният участък (фиг. 1), разположен непосредствено след преливното тяло и междинният стълб, който има значителна дължина и попада в участък с бурно състояние на течението. Дълбочината при гребена на косите вълни в зоната на оградните стени е меродавна за оценка на проектната им височина.

Може да се приеме, че изравняването на кинетичните характеристики на течението в напречен профил както при $238 \text{ m}^3/\text{s}$, така и при $320 \text{ m}^3/\text{s}$ се получава в зоната между мерните сечения 11 и 12.

Поради невъзможност за моделиране на процесите на самоаерация при възприетия геометричен мащаб, за оценка и корекция на трансферираните към прототип дъл-

бочини са приложени някои теоретични и емпирични зависимости, описващи със задоволителна точност явлението при една голямата част от инженерните задачи. Съгласно съществуващата теория за начало на генериране на самоаерация от повърхността може да се съди по достигнатата по дължина на бързотока средна по сечение скорост, която се сравнява с така наречената гранична критична скорост на аерацията [13,4]. Приложени са зависимостта за определяне на критичната скорост по зависимостта на Сликский 1986 и формулата на Wood 1983 [13] за зоната на поява на самоаерация, съответстваща на сечението, в което дебелината на граничния турбулентен слой обхваща цялата дълбочина на течението. Същите са решени итеративно за водно количество 238 m³/s, при което е установено, че възникване на самоаерация на течението може да се очаква в зоната на профил 12, т.е. на около 150 m от билото на преливника.

Предложена е корекцията на дълбочината след зоната на възникване на самоаерация според зависимостта на Straub и Andersen (1958) [13] $h_a = h(1+\beta)$, където h_a е дълбочината на водно-въздушната смес в зоната на напълно развито аерирано течение, $\beta = 0,12(Fr - 25)^{0,5}$ – среден коефициент на аерация, а Fr е числото на Фруд, изчислено за търсеното сечение със скоростта на плътната струя. В профил 14 се получава стойност на коефициента β от 0,445, за която в специализираната литература се препоръчва да бъде занижена с около 40–50% [13]. Като се има предвид увеличението на моделните дълбочини с около 9–10%, поради по-високата грапавина на модела, за реалните дълбочини в натурни условия следва да се приемат стойности от порядъка на 1,17–1,18 пъти измерените на модела (17–18% увеличение).

Проведени са и серия от опити при едно работещо преливно поле и е установено водно ниво в езерото, съответстващо на кота 585,56 m и 586,10 m (отговарящи на нивата при работа на две полета и водни количества съответно 238 m³/s и 316 m³/s). Водните количества при фиксирания нива са съответно 117 m³/s и 150 m³/s.

Посредством пиезометрите, разположени по дъното на бързотока, са установени пиезометричните налягания в характерни профили, като особен интерес представляват зоните на вертикалните криви. Минимално превишение над статичното налягане е отчетено във вдлъбнатата вертикална крива ВК2 при водно количество 238 m³/s. При пиезометър 11 (профил 14) е отчетен слаб вакуум, който е показател за отделяне на струята от дъното на бързотока.

4.3. Енергогасител и долен участък

Изпълнението по проект енергогасител не бе в състояние да осигури пълно погасяване на излишната кинетична енергия на течението при преминаване на 238 m³/s. Хидравличният скок се разпростира и по откосираната задна част на гасителя, предизвиквайки забележими пулсации на водните нива в края на хоризонталния участък и странично преливане над оградните стени с приблизителна преливна височина 50÷60 cm. Така формираният скок се характеризира със значителна нестабилност, а при минимално увеличение на водното количество напуска границите на басейна и ефективността на съоръжението рязко пада. Течението протича по цялото протежение на гасителя в бурно състояние, без възможност за генериране на хидравличен скок, а краят на откосирания участък работи като трамплинен изхвъргач. При така приетата конфигурация и геометрия на енергогасителя максималното водно количество, при което се получава добро погасяване на кинетичната енергия без преливане на оградните стени (диги) в долния участък, е 150 m³/s.

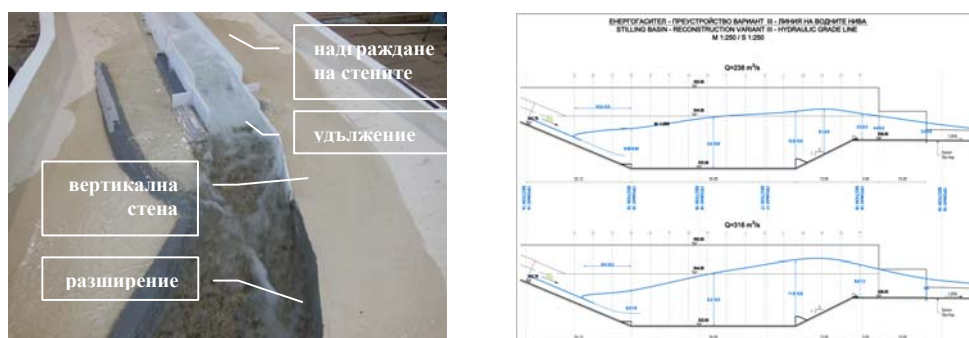
Поради значителния наклон на дъното в долния участък (1%) течението се намира в бурно състояние за водните количества, попадащи в диапазона, представля-

ващ интерес. Установено е разкъсване на хидравличната връзка между течението в гасителя и долния участък, което дава основание да се счита, че долните водни нива не оказват влияние на процесите на гасене на енергия в басейна.

4.4. Реконструкции

Предвид много добрите хидравлични показатели, установени от експерименталните изследвания на проектния вариант на подходния участък, преливното тяло и бързото течение, не бе предвидено разглеждане на алтернативни варианти на тези съоръжения. Необходимост от подобряване на хидравличните показатели в зоната на енергогасителя и долния участък и осигуряване на задоволително погасяване на излишната кинетична енергия до $320 \text{ m}^3/\text{s}$ бе налице.

Върху физическия модел бяха изпълнени и изпитани няколко варианта на модификация на енергогасителния басейн и долния участък, състоящи се в монтаж на разсейвателни и водобойни тела, праг тип Ребок, промяна на геометрията на басейна и долния участък и увеличаване на височината на оградните стени (фиг. 4).



Фиг. 4. Действие на енергогасителя и долния участък при $320 \text{ m}^3/\text{s}$ - реконструкция 3

Измежду всички тествани реконструкции на гасителя вариант 3 осигурява най-добро погасяване на излишната кинетична енергия. Той включва удължаване на хоризонталния участък на гасителя за сметка на увеличаване на наклона на откосираната секция от 1:3 до 1:2 и при запазване на общата дължина на съоръжението, надграждане на оградните стени, удължаване на хоризонталния участък след гасителя и изграждане на вертикална стена по левия бряг на долния участък (фиг. 4). За подобряване на хидравличното действие на гасителя значително спомагат монтираните разсейвателни тела в края на бързото течение, оразмерени в съответствие с водобойните тела в началото на откосирания участък [7] и прага тип Ребок [5] в края му. Изпитванията на предложения окончателен вариант на енергогасителя сочат добро хидравлично действие на съоръжението при водни количества, надхвърлящи $320 \text{ m}^3/\text{s}$ (фиг. 4).

5. Заключение

Проведените моделни изследвания сочат задоволителни хидравлични показатели в зоната на подходния участък, преливника и бързото течение. В подходния участък се формира спокойно течение с почти равномерно разпределение на скоростите в напречните профили. Обтичането на оградните стени е плавно, без изкривяване на токовите линии и образуване на вихрови и мъртви зони. Контракцията на течението вследствие

обтичането на междинния стълб е значителна. Преливникът осигурява безпроблемно отвеждане на високите води с вероятност за поява веднъж на 1000 години (с хидравлично падащи затвори) при запас до кота корона от 1,3 m и веднъж на 10 000 години при запас от 0,29 cm (без отчитане на подуването на водната повърхност).

Разпространението на коси вълни по дължина на бързотока създава условия за преливане над оградните стени в края на преходния участък при водни количества, надхвърлящи 1000-годишната вълна (при наличие на хидравлично падащи затвори) от 316 m³/s, поради което е препоръчано увеличаване на височината им в тази зона. Радиусите на вертикалните криви са подходящо подбрани и не предизвикват недопустимо понижение или превишение над статичното налягане. Оценено е увеличението на дълбочините в натура вследствие поява на самоаерация от повърхността въз основа на данните от хидравличния модел в комбинация с анализ на емпирични зависимости. При окончателния избор на височината на оградните стени е прието измерените върху хидравличния модел дълбочини да бъдат увеличени с приблизително 17–18%.

Проектният вариант на енергогасителя не осигурява задоволително погасяване на кинетичната енергия за водни количества, надвишаващи 238 m³/s (вероятност за поява веднъж на 1000 години, без хидравлично падащи затвори), поради което в хода на изследването са разгледани няколко варианта на модификация на гасителя и долния участък. Предложен е окончателен вариант на оформление на гасителя и долния участък, който гарантира добро погасяване на кинетичната енергия за водни количества, надхвърлящи 320 m³/s (1000-годишно при наличие на хидравлично падащи затвори).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Carlier, M.* *Hydraulique generale et appliquee*, Paris 1979.
2. *Khatsuria, R. M.* *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York 2005.
3. *Kobus, Helmut.* *Hydraulic Modelling*, 1980.
4. *Kramer, Kristian.* *Development of Aerated Chute Flow*. ETH – Zurich, 2004.
5. *Hager W. H.* *Energy dissipator and hydraulic jump*. Dordrecht 1992.
6. *Novak, P., V. Guinot, A. Jeffrey, D. E. Reeve.* *Hydraulic Modeling – An Introduction*. Spon Press. London & New York, 2011.
7. *Peterka, A. J.* *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Denver, Colorado, 1984.
8. *United States Bureau of Reclamation (USBR).* *Design of small dams*. A Water Resources Technical Publication. 1987.
9. *Wilhelms, S., Gulliver, J.* *Self-Aerated Flow on Corps of Engineers Spillways*. Technical Report W-94-2, 1994.
10. *Киселев, П. Г.* *Справочник по гидравлическим расчетам*. Москва. Энергия (Kisselev P. G - Handbook of hydraulic calculations, Moscow, 1972).
11. *Луцев, Н., Б. Казаков, К. Даскалов и колектив.* *Хидравлично моделно изследване на съоръженията за отвеждане на високите води към хидровъзел Луда Яна*. Доклад. София, 2014.
12. *Лятхер, В. М, А. М. Прудовский.* *Гидравлическое моделирование*. Москва, 1984.
13. *Слисский, С. М.* *Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений*, Москва, 1986.

HYDRAULIC MODEL STUDY OF LUDA YANA DAM

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

Keywords: dam, hydraulic modeling, flood discharge structures, spillway

Research area: engineering hydrology, hydraulics and water management

ABSTRACT

Luda Yana Dam is designed to provide potable water for the town of Panagyurishte and series of settlements and industrial companies in the region by regulation of Panagyurska Luda Yana river runoff. The dam construction and location govern the increased requirements for safe flood evacuation and minimization of the erosive capacity of flow downstream the spillway.

In order to provide sufficient discharge capacity of the dam spillway and acceptable performance of the stilling basin a hydraulic model study on geometrically scaled physical model 1:40 (model:prototype) was carried out. The model tests cover the spillway and approach section, the transitional section and chute as well as the stilling basin and downstream section. In the course of the study alternative variants of stilling basin and downstream section were considered. The recommendations on the final design and configuration of all structures are proposed based on the obtained results and analysis.

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

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