

Проф. д-р инж. Димитър Тошев,
доц. д-р инж. геолог Радослав Върбанов,
гл. ас. инж. Тоньо Чолаков

ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ЗЕМНА СТЕНА ПРИ БЪРЗО ИЗТАКАНЕ НА ЯЗОВИРА

NUMERICAL MODELING OF DAM STABILITY IN CASE OF RAPID DRAWDOWN

D. Toshev, R. Vurbanov, T. Cholakov

Summary: *This design development is result of earth dam upstream slope shearing in case of rapid water drawdown in the reservoir. The dam body built up by clay embankment is 22 m high. Shearing of the upstream slope has occurred at operational drawdown of water level reaching 1 m in 24 hours.*

The report presents numerical analysis of the upstream slope seepage and stability and identification of the dam body behavior in the process of water evacuation. The Back analysis demonstrates the mechanism of the slope stability loss. Good coincidence of numerical method and reality was established allowing the Designer recommend safe speed of drawdown ensuring stability of the upstream slope.

Въведение

Известно е, че при аварийно или експлоатационно бързо изтакане на язовира съществува опасност от дестабилизиране на водния откос на земните язовирни стени. Устойчивостта на откоса намалява вследствие отнемане на част от водния натиск върху него. При понижаване на водното ниво след продължителна експлоатация на язовира при високи водни нива настъпва процес на вторична консолидация на насипа. При насип от глинести почви този процес на дрениране е бавен, при което почвата преминава от консолидирано в неконсолидирано състояние, с понижена якост на срязване.

Допустимата скорост на понижаване на водното ниво е от изключителна важност за експлоатационното звено. Обичайно проектантът оказва тази скорост в Проект за експлоатация и поддържане на язовира.

Теоретични основи на явлението

Процесът на дрениране и консолидация на кохезионни почви при понижаване на водното ниво се представя с теорията на филтрационната консолидация на Терцаги. Практически скоростта на

понижаване на водното ниво е относително толкова висока, че почвата няма достатъчно време да се дренира. В този случай говорим за бързо понижаване на водното ниво. Съпоставката между скорост на понижаване на водното ниво и дренирането на насипа е в основата на оценката на устойчивостта на водния откос на земнонаситните стени. При бързото понижаване на водното ниво в язовира депресионната повърхност в стената не може да го следва и изостава над него. Устойчивостта на водния откос е застрашена от хлъзгане поради високото хидродинамично налягане в скелета на почвата и липсата на външно поддържащо натоварване от водата.

По принцип могат да се различат два случая:

- Първият случай касае бързо понижаване, което се случва непосредствено след построяване на стената. Тогава недренираната якост на почвата е тази в края на строителния период, когато консолидацията под действието на собственото тегло на насипа не е завършила;

- при втория случай, който се повтаря многократно при продължителната експлоатация на язовирната

стена, понижението се случва след продължителна установена филтрация през стената, при недренирана якост на земния насип.

У нас, понижението на водното ниво спрямо процеса на дрениране се категоризира като бързо, междинно или бавно по следната зависимост [1]:

$$(1) \quad \frac{1,65}{m^{3/2}} < \frac{k}{\mu \cdot v} < 100$$

(бързо понижение) (бавно понижение)

където:

k – коефициентът на филтрация;

μ – активен обем на порите;

v – скоростта на понижение на водното ниво;

m – коефициентът на наклона на откоса.

Бавното понижение е характерно за силно пропускливите почви (пясъци, чакъли, баластра), при които дренирането протича бързо, откосът е дрениран до естествена влажност и депресионната повърхност следва пониженото водно ниво. При тях филтрационната консолидация е краткотрайна, без намаляване на якостта на срязване на почвата.

При бързо понижение на водното ниво целият воден откос остава водонаситен, с намалена якост на срязване и понижена сигурност срещу хлъзгане. Този случай е характерен за глинестите почви. Тук е представен изследван от авторите случай на хлъзгане на водния откос на язовирна стена “Златовръх” изпълнена от глинен насип.

Прилагайки теорията на консолидация на Терцаги, можем да оценим времето за преминаване на почвата от недренирано в дренирано състояние t [2]:

$$(2) \quad t = 4 \frac{D^2}{C_v}$$

D - максимален път за отцеждане на водата, m ;

C_v - коефициент на консолидация, m^2/s

Основни данни за язовира и язовирната стена

Язовир “Златовръх” е построен на Политьовото дере, на 9 km от с. Дълбоки извор, община Асеновград, област Пловдив.

Строителството е извършено в периода 1965–1971 г. Основното предназначение на язовира е напояване на 6200 дка в напоително поле “Златовръх” от напоителна система “Мечка”.

Хидровъзелът се състои от язовирна стена, водовземна шахта, основен изпускател, изходна шахта на изпускателя, челен преливник разположен на десния бряг, пълнеща деривация и контролноизмервателна система (КИС).

В съответствие с Протокол от 1972 г. за въвеждане в експлоатация основните характеристики на язовира са:

Тип на стената

еднородна земнонаситна;

кота на короната 311.00;

ширина на короната 4.00 m;

кота нормално водно ниво (НВРВН)

309.50;

височина на стената 22 m;

общ обем на язовира $1,68 \cdot 10^6 m^3$;

мъртъв обем 100 000 m^3 ;

обем на насипа в стената 214 000 m^3 ;

залаята площ 264 дка;

воден откос 1:2,70;

въздушен откос 1:2,40;

Язовирът се пълни с изравнени води от язовир “Леново” посредством открит деривационен канал с дължина 600 m, оразмерен да провежда 850 l/s.

В план стената се състои от централна част, преграждаща Политьовото дере и лява крилна стена с ос под ъгъл спрямо оста в централната част. Водният откос на стената е облицован с подредена скална облицовка с дебелина 30 cm върху баластрен филтър 15 cm. Сухият откос е затревен.



Фиг. 1. Поглед към язовирната стена

Водовземането от язовира се реализира от водовземна шахта и основен изпускател. Шахтата с размери 2,00/2,00 m и височина 6,40 m е ситуирана в петата на

водния откос, непосредствено до левия скат. На челната страна на шахтата, над кота 292,10 е монтирана предпазна решетка.

Основният изпускател е заложен на кота 592,10. Представява стоманена тръба \varnothing 800 mm в стоманобетонен кожух с дебелина 20 cm. Оразмерен е да провежда максимално водно количество 4,60 m³/s. В изходна шахта на изпускателя са монтирани два шибърни крана \varnothing 800mm. Основният изпускател е в състояние да източи язовира за около 5 дни.

Преливното съоръжение се състои от подводещ канал с дължина 50 m, челен преливник и бързоточна част 136 m. Оразмерено е за водно количество 6 m³/s.

В съответствие с актуалните “Норми за проектиране на хидротехнически съоръжения. Основни положения”, кн. 11 от 1985 г. таблица 1 язовирна стена “Златовръх” с височина 22 m, фундамна върху глинеста почва се класифицира като съоръжение от III клас.

В съответствие с “Наредба № 2 от 2004 г. за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони” по скалата на Медведев-Шпонхоер-Карник язовир “Златовръх” попада в сеизмичен район с интензивност от IX степен със сеизмичен коефициент $K_s = 0,27$.

Геоложки строеж в створа на стената

Геоложкият строеж в створа на стената изяснен при геоложки и хидрогеолож-

ки проучвания, проведени през 1965 г. и с допълнително проучване от 1970 г. е следният:

Ляв скат – представен е от склонов насип от кафяви глини с дебелина $2 \div 6$ m, под който са плиоценски средни чакъли със запълнител от праховопесъклива глина. На дълбочина от 6 до 12 m основата на язовирната стена в левия скат е изградена от плиоценски глини;

В руслото на дерето залягат глинести чакъли от алувиално-делувиален произход и зеленикави глини с тънки прослойки от глинести чакъли;

На десния скат, под почвен слой повсеместно се разкриват плиоценски зеленикави глини.

Пластовете са класифицирани като пропускливи, което е наложило изграждане на глинени противофилтрационен зъб с дълбочина до 4,00 m в руслото и 1,00 m в двата ската. При изпълнението на зъба в левия скат са разкрити заглинени чакъли, което е наложило удълбочаване на зъба.

Върху левия скат, на около 100 ÷ 150 m пред оста на стената в чашата на язовира са разработени кариери, от които е добивана глина за насип в стената.

Геотехнически показатели на насипа

По данни от опробване на глинения насип по време на изграждането на стената геотехническите показатели на насипа са дадени в таблица 1.

Таблица 1. Геотехнически показатели на насипа в тялото на язовирна стена „Златовръх”

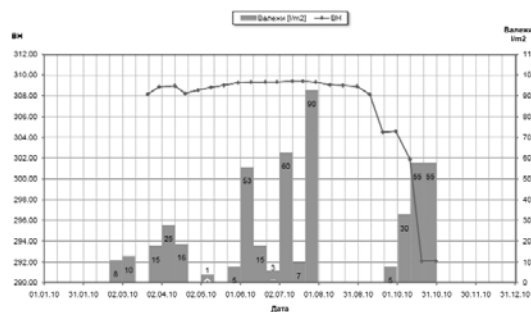
Показател	Мярка	Средна стойност
Об. плътност на скелета	g/cm ³	1,68
Об. плътност влажно състояние	g/cm ³	2,02
Водно съдържание	%	20,8
Оптимална водно съдържание	%	21,0
Ъгъл на вътрешно триене	Градуси	20°30'
Кохезия	кРа	21
Коеф. на филтрация	cm/s	3,37.10 ⁻⁸
Показател на пластичност	%	29,6
Зърнометричен състав	%	
Чакъл ≥ 2 mm		2
Пясък $2 \div 0,05$ mm		31
Праш $0,05 \div 0,005$ mm		36
Глина $\leq 0,005$ mm		31

По зърнометричен състав и по показател на пластичност насипът в стената се класифицира като водопълтна глина.

Същност на проблема

През периода март - август 2010 г. в язовира е поддържано високо водно ниво над кота 308,00, близко до котата на преливника 309,60. Това от своя страна обуславя водонасищане на насипа в тялото на стената близко до максимално, което за съжаление поради неизправност на пиезометричната система не е регистрирано.

В началото на м. септември започва интензивното изтакане на язовира. В продължение на един месец от 10.09.2010 г. до 20.10.2010 г. водното ниво е понижено с 16 m (от кота 308,12 до кота 292,10). Средната скорост на понижение за целия период е 0,53 m/ден. През втората десетдневка на октомври понижението е 10 m със средна скорост 1 m/ден. Очевидно е, че при такова бързо понижение насипът не е могъл да се отцеди, което е довело до хлъзгане на скалната облицовка заедно с част от глинения насип под него. Фронтът на свлечения участък (свлачищното тяло) възлиза на около 120 m. Крилната стена на левия скат не е засегната от свличането.



Фиг. 2. Диаграма на валежите и крива на изтакане на язовира

Първоначалното свличане, установено на 19.10.2010 г. е в долната половина на стената, след което хлъзгането на облицовката заедно с подложния филтър (баластра) и тънък пласт от глинения насип е продължило във височина. За това свидетелстват появилите се валове на изтласкан насип на различни нива (многостъпално разкъсване). При след-

ващите деформации на облицовката в горния край на откоса, на 4-6 m под короната се формира вежда на свлачищното тяло.



Фиг. 3. Обрушване на водния откос на стената

Методика на изследванията

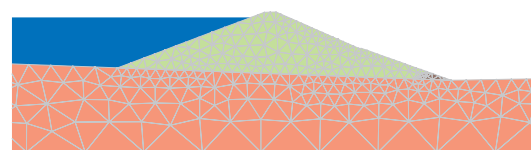
Критерии за бързо понижение

В съответствие с критерий 1 реализираното понижение е бързо, характерно за водопълтни глинени.

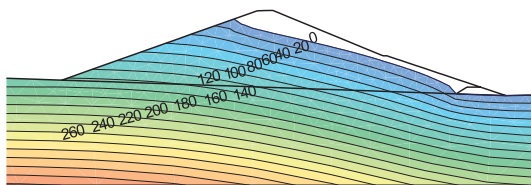
По критерий 2 времето, необходимо за дрениране на почвата на дълбочина 5 m е 122 дни.

Филтрационни изследвания

При обработка на данните с водните нива в язовира, както бе споменато по-горе, прави впечатление продължителността на задържане на нивата около котата на преливния ръб. Установяването на максималната граница на водонасищане в тялото на стената е разгледано като първи етап на проведените изследвания. За целта е разработен числен модел с крайни елементи на язовирната стена заедно с основата. Моделирана е стационарна филтрация при пълен язовир до кота 309.40. Получени са разпределения на налягания, напори, скорости на филтрационния поток, които служат като входни данни за следващия втори етап.

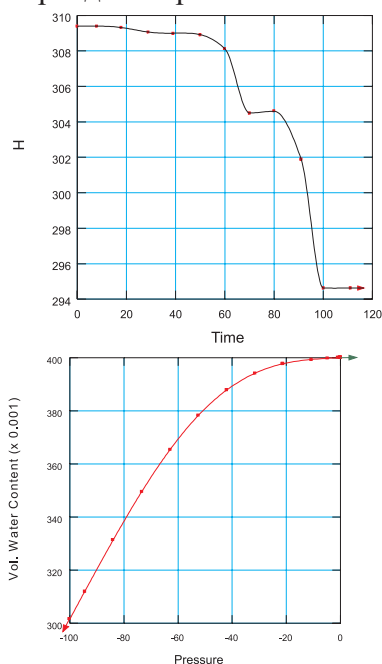


Фиг. 4. Числен модел



Фиг. 5. Изостати на филтрационното налягане при пълен язовир

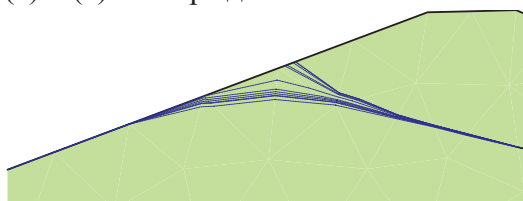
Като втори етап на изследванията е разглеждана нестационарна филтрация при бързо понижаване на водното ниво. За целта са създадени правила за изменение на водните нива в язовира от 12.07.2010 до 31.10.2010 г. (111 дни). Зададена стъпка на визуализация е през 15 дни, а след 80-тия ден - през 5 дни, като началната депресионна крива съответства на 5-я ден. В изчислителния процес са взети под внимание вида на материала, остатъчната влага в неговите пори и интензивните дъждове в този период на бързо изтакане на язовира.



Фиг. 6. Криви на понижаване на водното ниво и на филтрационното налягане във функция от водното съдържание

Получените резултати красноречиво говорят, че едномесечния период, в който става значително понижаване на нивото в язовира, е крайно недостатъчен за осушаването на откоса и стената остава почти изцяло във водонаситено състояние. Депресионната крива за разглеждания период се е понижавала едва с около 1.90 m в най-високата си част. Това разбира се води до незначителни

промени на хидродинамичното налягане в порите, което както е известно влияе негативно на стабилитета на водния откос. Като потвърждение на това е факта, че в деня на направения оглед в горния край на свлечения участък формираният разсед е с потъване на насипа на дълбочина около 2.00 m. В него ясно личат оводнени участъци от глинестия насип на дълбочина 1.20 – 1.50 m, от които се дренира вода. Повече от месец след падане на водното ниво, видимото дрениране от разседа на насипа продължава поради високата му водоуплътност. Приложените критерии (1) и (2) потвърждават това.



Фиг. 7. Линии на водонаситане на насипа

Стабилитетни изследвания

Третият етап от изследването включва разглеждане на устойчивостта на водния откос. Проведени са изчислителни процедури за 5 етапа от бързото понижаване на водата в язовира. За всеки един от тях са намерени коефициент на сигурност срещу хлъзгане по различни критерии (Bishop, GLE, Ordinary), но поради факта, че в българското законодателство като критерий е залегнал „Фелениус-Терцаги“, то той е бил водещ, към който са се придържали авторите на доклада.

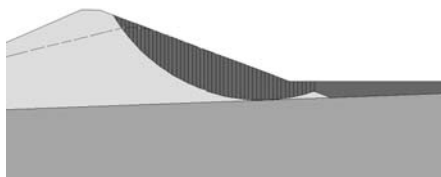
Един кратък анализ на получените резултати показва, че при водни нива в язовира до кота 302.15 коефициентите на сигурност срещу хлъзгане са над 1.00, което се дължи частично на задържащото действие на водния пласт в езерото. При 95-тия ден от разглеждания период (което съвпада със забелязаното първо свличане на откоса на 19.10.2010 г.), стойностите на коефициента на сигурност, изчислен по приложените методи, падат под 1.00.

Получените меродавни хлъзгателни повърхнини значително се доближават до наблюдаваното реално хлъзгане в тялото на стената, видно от проведените геоложки изследвания след този процес [5].

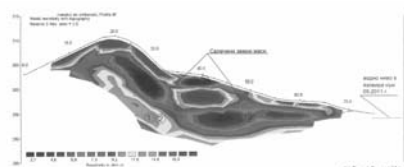
Таблица 2. Коефициенти на сигурност на водния откос

Ден/ВН	Метод	Ordinary	Bishop	Janbu	GLE
90d (302.15)		1.058	1.191	1.103	1.192
95d (297.54)		0.861	0.946	0.901	0.947
95d (297.54) (с пукнатини)		0.814	0.913	0.845	0.915

При едно задълбочаване на изследванията, което включва и вероятността от поява на пукнатини, се вижда, че се получават вертикални срязвания в места съвсем близки до мястото на получената „вежда” по водния откос на стената.



Фиг. 8. Меродавна повърхнина на хлъзгане на откоса



Фиг. 9. Действителна повърхнина на срязване на откоса

Заклучение

Причина за настъпилото мащабно свличане на облицовката на водния откос е бързо празнене на язовира, съчетано с обилно оводняване от дъждовни води. Данните сочат, че след дълготрайно водно ниво непосредствено под котата на преливника е настъпило бързо понижаване на водното ниво с цел осушаване и ремонт на водоземната шахта. Скоростта на понижаване на водното ниво през м. октомври е достигнала 1.00 м/ден, недопустимо висока за откоси, изпълнени от глинести почви. Като допълнително негативно обстоятелство също трябва да се отбележи, че долната част на водния откос, под кота 295.00 е затрупан с тинести отложения, които препятстват дренването на откоса. Свличането е достигнало на около метър над тази кота. Езикът на свлачищното тяло е непосредствено над тинестите отложения.

Налага се изводът, че независимо от регламентираното в правилниците време за изтакане на язовирите 15-30 денонощия, за което се оразмеряват облекчителните съоръжения на язовирите, трябва да се подхожда индивидуално към всеки обект, като се взимат под внимание следните параметри:

Състояние на язовирната стена според критериите за конструктивна и технологична сигурност, съгласно чл.46 от Наредба 13 [4];

вид на материала/ите, от които е изграден насипът;

водни нива в язовира преди предстоящо понижаване;

физикомеханични показатели и водно съдържание на насипа;

критерий за бързо понижаване на водното ниво в язовира.

Литература

1. Абаджиев, Х. Филтрация в земнонасипните язовирни стени и устойчивост на водния откос при понижаване на водното ниво в язовира. *Хидротехническо строителство*, 1968, № 3 и 4.

2. Duncan, J.M., St. G. Wright. *Soil Strength and Slope Stability*, 2005.

3. Патоков, Ив., Ив. Папазчев, Д. Тошев, Л. Шейтанова. *Хидротехнически съоръжения – II част, Язовирни стени от местни материали, облекчителни и водоземни съоръжения*. София, 1998.

4. Наредба 13 от 29 януари за условията и реда за осъществяване на техническата експлоатация на язовирните стени и съоръженията към тях. *БСА*, 2004, бр.3

5. Върбанов, Р. Използване на съвременни геофизични методи за диагностика на земно-насипни язовирни стени. *Пети Българо-австрийски семинар "Малки язовири и ВЕЦ"*, март 2012, София.